



**Universidad Carlos III de Madrid**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**INGENIERIA INDUSTRIAL**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

*“Messa a punto di una strumentazione di laboratorio per la misura della trasmittanza termica con il metodo della camera calda”*

**VICTOR CALZADILLA GARCIA**

**Marzo, 2009**

# Resumen

Con la publicación del DLgs 192/05, Italia adopta la Directiva europea 2002/91/CE, “Energy performance of buildings”, que hace referencia al rendimiento energético en los edificios. Tal decreto supone una medida significativa enfocada a conseguir el cumplimiento de los límites establecidos por el protocolo de Kyoto. Utilizando una frase contenida en el mismo, el objetivo no es otro que establecer “los criterios, las condiciones y los procedimientos para mejorar las prestaciones energéticas de los edificios con el fin de estimular el desarrollo, la valorización y la integración de las fuentes renovables y la diversificación energética y contribuir a conseguir los objetivos nacionales de limitaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero impuestos por el protocolo de Kyoto”

Según tal decreto, todo edificio reestructurado o de nueva construcción deberá disponer de la certificación energética correspondiente, es decir, un documento emitido por un ente autorizado que atestigüe que se superan ciertos requisitos de aislamiento y rendimiento de los distintos equipos de climatización, no solo del conjunto sino también de cada componente de manera individual.

Dado que todos los componentes de un edificio (ventanas, puertas, muros...) deberán cumplir unos requisitos mínimos de aislamiento térmico, surge la necesidad de disponer de laboratorios autorizados donde los fabricantes de estos componentes puedan obtener la certificación de sus productos. Es por esto que se decide la construcción de una *Hot Box* para la medida de la transmitancia térmica de ventanas y puertas completas en el Laboratorio de Energética de la *Università degli Studi di Perugia*. El diseño general de la máquina ha sido ya realizado en el transcurso de un trabajo anterior y al inicio de este proyecto esta se encontraba en fase de fabricación.

La realización del presente proyecto ha sido posible gracias al convenio suscrito entre la “*Università degli Studi di Perugia*” y la “*Universidad Carlos III de Madrid*” dentro del marco para la movilidad europea universitaria *ERASMUS*. En este trabajo se aborda la finalización de la construcción, instrumentación y puesta a punto del equipo y diseño del programa de adquisición de datos para su posterior análisis utilizando software

apropiado. Tanto el diseño del aparato como las pruebas de calibración y medida han sido realizados en conformidad con la correspondiente normativa técnica italiana:

- UNI EN ISO 8990: “*Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario*”
- UNI EN ISO 12567-1: “*Descrizione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda*”
- UNI EN 1934: “*Prestazione termiche degli edifici: Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro*”

El documento está dividido en cinco capítulos en los que se abordan diversos aspectos desde la introducción teórica a la transferencia de calor a la exposición de los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre especímenes, pasando por una descripción detallada de la normativa, de la máquina y del sistema de control y adquisición de datos utilizado.

El primer capítulo consiste en una introducción teórica al concepto de *calor*. Este viene definido como “*la energía que se propaga como consecuencia de una diferencia de temperatura*” resaltando el hecho de que el concepto no está por tanto ligado a un determinado estado de equilibrio sino a una transformación: cuando esta termina, el calor deja de existir.

Tras la definición, se analizan los diversos mecanismos de transferencia de calor: *conducción, convección y radiación*. Los tres estarán presentes en los ensayos de laboratorio y por eso resulta necesario conocer las leyes físicas que gobiernan cada uno de ellos.

La conducción es el modo ligado a procesos que tienen lugar a nivel atómico o molecular. Se requiere en todo momento la presencia de un medio material. En los gases la transmisión de calor por conducción se debe a procesos de difusión atómica o molecular, mientras que en los líquidos y sólidos dieléctricos acontece por medio de ondas elásticas. En los metales son los electrones libres los que transportan la energía.

En la convección, el transporte de energía se debe al movimiento macroscópico de masa. La complejidad es mayor que la conducción y para su resolución se suele utilizar

un coeficiente  $h$  de modo que la cantidad de energía intercambiada es proporcional a dicho coeficiente y a una diferencia de temperaturas. El coeficiente de convección depende de diversos factores: geométricos, de las propiedades del fluido, de las condiciones de contorno...y generalmente se obtiene mediante el uso combinado del análisis dimensional y pruebas en laboratorio.

Por último, se analiza la transferencia de calor por radiación. Tras el desarrollo del concepto, se analizan las propiedades radiantes de los cuerpos y se introduce el concepto teórico de *cuerpo negro*. En la última parte del apartado se aborda la explicación de los factores de vista y se muestra la resolución de un problema simple de transferencia de calor entre dos superficies negras.

En el segundo capítulo se profundiza en el estudio de la normativa técnica en el campo de la medida de las propiedades térmicas.

En primer lugar se analiza la norma UNI EN ISO 8990, que describe de manera general los requisitos de los equipos, sensores... para la medida de las propiedades térmicas en régimen estacionario por el método de la *caja caliente*, para seguir con la UNI EN ISO 12567-1, que especifica las condiciones necesarias cuando los ensayos se realizan sobre puertas y ventanas. La normativa proporciona las bases dimensionales, los materiales a utilizar (o en su defecto, los requisitos mínimos de aislamiento, emisividad...que deben satisfacer) de las distintas partes de la máquina. También especifica los sensores apropiados y su disposición durante la prueba, así como los cálculos necesarios para la obtención de los resultados requeridos y las condiciones que se deben satisfacer durante la prueba para que estos puedan considerarse válidos.

Se analiza también la norma UNI EN 1934 porque, si bien el diseño de la máquina se ha realizado conforme a las directrices marcadas por las otras dos normas, tras comprobar que la Hot Box cumple todos los requisitos exigidos por la nueva norma, se han realizado medidas para obtener el valor de la resistencia térmica de un espécimen en hormigón de baja densidad siguiendo los procedimientos descritos en esta.



En el tercer capítulo se realiza una descripción general de las partes que componen la máquina, también conocida con el término en inglés: “*Hot Box*”.

La idea es simple. La muestra a ensayo se coloca entre dos espacios cerrados, que llamaremos cámaras caliente y fría, cuyas temperaturas ambiente son conocidas. El sistema de adquisición de datos permite la monitorización continua del proceso en toda la cámara. Cuando se alcanza el estado estacionario, usando las temperaturas sobre la superficie de la muestra, en el aire y en las superficies que “se proyectan” sobre la muestra, se calculan los valores de las distintas propiedades térmicas del material a ensayo.

A grandes rasgos, las partes que deben estar presentes en toda Hot Box son:

La **estructura de soporte**, que permite el posicionamiento y la sujeción del elemento que se quiere ensayar. Se debe diseñar de manera que las dimensiones finales sean tales que no se disturbe la medida, sea apto para realizar pruebas con ventanas de diferentes tamaños normalizados y la fijación de estas se realice de forma rápida, segura y sin dañar la propia estructura de soporte.



*Figura 1.- Estructura de soporte*

La estructura está formada por un marco fijo que alberga tres paneles móviles: uno en forma de L, cuya sustitución permite la realización de pruebas sobre ventanas de

distintos tamaños, el corredizo lateral, que también se sustituye en función del tamaño de la ventana a ensayo y por último el panel superior. Todos los paneles tienen la cara interior recubierta de goma aislante para garantizar un contacto flexible y limitar la transferencia de calor en la interfaz estructura-muestra. El lateral y el superior son accionados por cilindros neumáticos, de forma que en posición de cierre ejercen presión sobre la ventana. Gracias a este mecanismo, es posible realizar la fijación de manera rápida y sin dañar la estructura en cada ensayo.

Las dos **cámaras** a diferentes temperaturas. A la hora de elegir las dimensiones de estas, se ha tenido en cuenta las dimensiones del marco fijo de la estructura de soporte, el espacio interior necesario para los equipos de climatización y medida y las pérdidas máximas de calor a través de las paredes.

Ambas cámaras se encuentran montadas sobre una estructura de metal dotada de ruedas, que permite la apertura de la máquina para llevar a cabo el montaje de la ventana y de los aparatos de medida y el cierre, cuando todo está preparado para la realización de la prueba.



*Figura 2.- Vista exterior de las cámaras, con la estructura de soporte en el medio*

Los **sistemas de climatización** permiten mantener las cámaras a la temperatura requerida. Generalmente se usan temperaturas entre -10/10 °C para la cámara fría y 20/30 °C para la cámara caliente.

Dentro de la cámara caliente se han introducido 50m de cable de alta resistividad, distribuidos de manera uniforme por toda la superficie de la pared posterior. El sistema está controlado por un regulador PID, conectado a un termopar que mide la temperatura del aire en un punto central de la cámara. Cuando la temperatura obtenida del sensor es menor de la establecida, el controlador enciende la resistencia.

En la cámara fría se ha instalado un sistema frigorífico como se muestra en la figura:

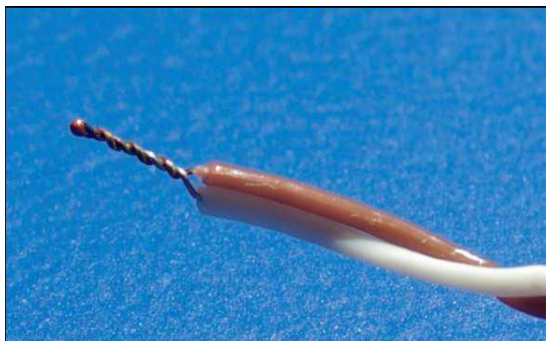


*Figura 3.- Evaporador del sistema de refrigeración*

El **panel de radiación** se sitúa en cada cámara entre los sistemas de climatización y la ventana, suficientemente alejado de esta para no obstaculizar el movimiento convectivo del aire. Garantiza la uniformidad de la radiación recibida por la muestra, de forma que no “ve” directamente las fuentes de calor.

En el capítulo cuarto se habla de los sistemas de adquisición y tratamiento de datos utilizados.

Para la medida de la temperatura en los distintos puntos de la máquina (superficie de la ventana, superficie de la estructura de soporte, aire...) se han utilizado termopares de tipo T, como recomienda la norma UNI EN ISO 12567-1. Estos presentan una sensibilidad suficiente ( $48,2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) y un amplio rango de temperaturas.



*Figura 4.- Termopar tipo T*

Dado el elevado número de sensores presentes en la *Hot Box* (47 termopares en cada cámara) el análisis de los resultados no puede hacerse sino con un ordenador.

Los termopares se conectan al ordenador con el sistema *FieldPoint* de la *Nacional Instrument*, formado por: *Módulo Input Termopar*, *Bloque conector* e *Interfaz Ethernet/Serial*.

Así, los valores medidos por cada termopar pueden ser visualizados en el ordenador con el programa *Automation Explorer* de la *NI*. Este software permite configurar parámetros de la adquisición. El tratamiento de los datos se realiza con el software compatible *LabVIEW*, también de la *NI*.

*LabVIEW* (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de desarrollo de aplicaciones orientado tanto a la adquisición de datos y gestión de instrumentación electrónica como al análisis y elaboración de señales.

Como parte de este proyecto, han sido desarrollados utilizando el mencionado lenguaje dos aplicaciones para la adquisición, tratamiento y almacenamiento de los datos obtenidos de los diferentes sensores: uno conforme a la norma UNI EN 1934 y otro enfocado a las pruebas de calibración según la UNI EN ISO 12567-1.

El programa para pruebas según la norma *UNI EN 1934* permite la monitorización de la temperatura media, en el aire y sobre la superficie de medida, para ambas cámaras, en tiempo real.

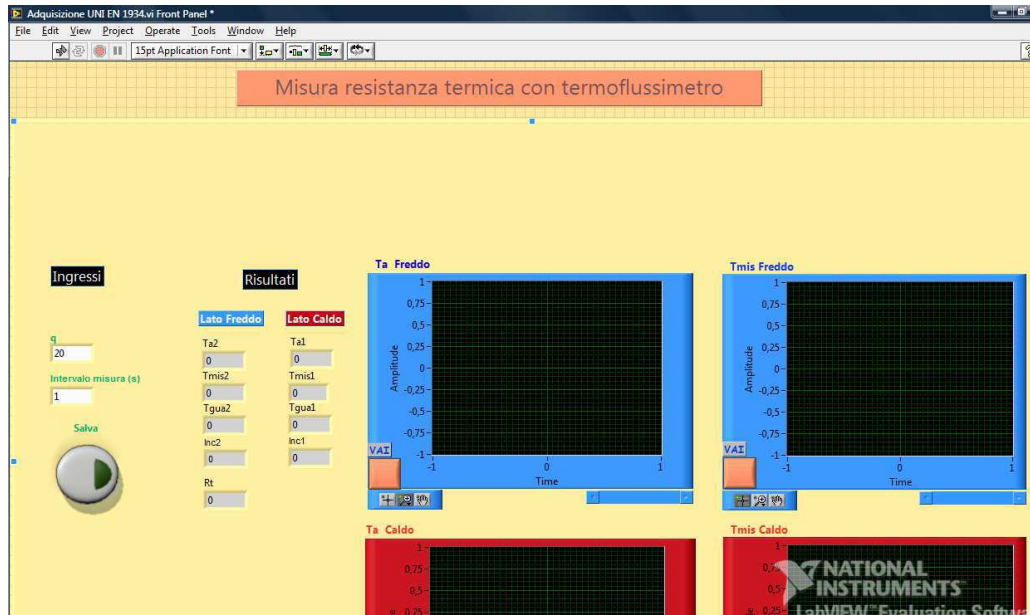


Figura 5.- Ventana principal del programa “Acquisizione UNI 1934”

En la ventana principal, el usuario puede modificar el intervalo de adquisición de datos y activar la opción de salvar los datos si lo desea. En este caso, el programa crea un archivo .txt, con los valores de para cada uno de los termopares, como se muestra en la figura.

1237 - Bloc de notas								
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
Tempo (s)	Ta1	Inc1	Ta2	Inc2	F0	F1		
15,000	20,933	0,000	-0,041	0,384	0,163	0,350	0,31	
30,000	20,992	0,000	0,942	0,384	1,346	1,502	1,44	
45,000	21,002	0,010	1,073	0,131	1,440	1,564	1,56	
60,000	21,013	0,010	1,028	-0,045	1,533	1,035	1,50	
75,000	21,040	0,028	0,264	-0,764	0,599	0,195	1,06	
90,000	21,037	-0,003	-0,072	-0,335	0,132	0,568	0,63	
105,000	21,019	-0,017	-0,030	0,042	0,195	0,475	0,35	
120,000	21,016	-0,003	0,208	0,239	0,568	0,724	0,56	
135,000	20,999	-0,017	0,561	0,353	1,066	1,097	0,97	
150,000	20,992	-0,007	0,886	0,325	1,377	1,440	1,28	
165,000	20,957	-0,035	1,139	0,252	1,564	1,689	1,56	
180,000	20,985	0,028	1,391	0,252	1,782	1,875	1,81	
195,000	20,971	-0,014	0,693	-0,699	1,066	0,475	1,56	

Figura 6.- Archivo .txt con las temperaturas de cada uno de los termopares

El programa de calibración según la UNI 12567-1 es similar al anterior, pero introduce además una parte de cálculo de la resistencia de la estructura de soporte y de las temperaturas ambiente conforme a la nueva norma. En la ventana “Ingressi e risultati” vienen introducidos los valores de las variables geométricas de la estructura,

como los factores de vista. También se debe dar la cantidad de energía introducida en la cámara caliente y se puede activar la opción de salvar los datos.

The screenshot displays a software interface with a yellow background, divided into two main sections: 'Ingressi' (Inputs) on the left and 'Risultati' (Results) on the right. A central red circular button labeled 'Salva Dati?' is positioned between the two sections.

**Ingressi Section:**

- Resistenza Pannello de Calibrazione (m2K/W):** Input field with value 0.
- Emissività:** Three input fields for 'Emissività-cal' (0), 'Emissività-b' (0), and 'Emissività-p' (0).
- Intervallo de misura (s):** Input field with value 1.
- Fattore di vista, Lato Caldo:** Five input fields for 'Cal-Irrid' (0), 'Cal-BordoSupp' (0), 'BordoSupp-Irrid' (0), 'BordoSupp-BordoSupp' (0), and 'Irrid-BordoSupp' (0).
- Fattore di vista, Lato Freddo:** Five input fields for 'Cal-Irrid' (0), 'Cal-BordoSupp' (0), 'BordoSupp-Irrid' (0), 'BordoSupp-BordoSupp' (0), and 'Irrid-BordoSupp' (0).
- Energia Inserita nella Camera Calda (W):** Input field with value 0.
- Trasmissione termica lineica zona di bordo W/(mK):** Input field with value 0.

**Risultati Section:**

- Resistenza superficiale totale:** Output field with value 0.
- Resistenze superficiale parziale:** Two output fields for 'Freddo' (0) and 'Caldo' (0).
- Resistenza del pannello di supporto:** Output field for 'Rsur' with value 0.
- Fattori convettivi:** Two output fields for 'Freddo' (0) and 'Caldo' (0).

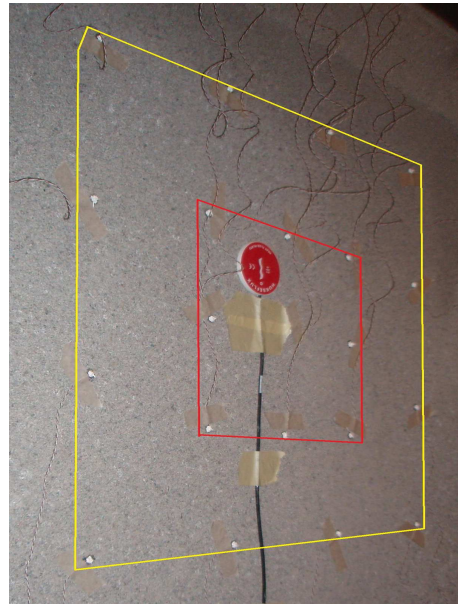
A red 'Inizio' button is located at the bottom right of the interface.

*Figura 7.- Ventana “Ingressi e risultati”*

El resto de ventanas muestran la representación temporal o espacial de las diferentes temperaturas dentro de la máquina.

El último capítulo está dedicado a la prueba realizada en el laboratorio sobre un espécimen de hormigón aligerado. La prueba viene realizada conforme a lo expuesto en la norma UNI EN 1934. El número de sensores que exige esta, es ligeramente inferior: 30 en cada lado de los que nueve miden la temperatura en el aire, nueve en la zona central del bloque y doce a su alrededor, necesarios para realizar las verificaciones de aceptabilidad de la prueba. El cálculo final de la resistencia se realiza utilizando la diferencia de temperatura superficial entre el lado caliente y el frío y el flujo térmico que atraviesa el bloque.





*Figura 8.- Vista del bloque de hormigón con los termopares sobre su superficie*

Tras la realización de la prueba se ha verificado el cumplimiento de una serie de requisitos para poder considerar los resultados obtenidos como válidos. Se ha comprobado el régimen estacionario de la temperatura en la superficie del bloque de hormigón, así como en el aire y que la diferencia de temperaturas entre puntos de la superficie se encuentra limitada, evitando así que exista un flujo paralelo a la superficie que pueda disturbar la medida.

Los resultados obtenidos en el ensayo se muestran en la siguiente tabla:

<b><i>Resistencia <math>R</math> (<math>m^2K/W</math>)</i></b>	<i>0,54</i>
<b><i>Resistencia Total <math>R_t</math> (<math>m^2K/W</math>)</i></b>	<i>0,71</i>
<b><i>Coductividad Térmica <math>k</math> (<math>W/mK</math>)</i></b>	<i>0,186</i>
<b><i>Transmitancia <math>U</math></i></b>	<i>1,41</i>

Finalmente, en el apartado de conclusiones se establecen los trabajos futuros a realizar sobre la *Hot Box* con objeto de limitar los errores de medida, calibrar adecuadamente la máquina y comenzar así con los trabajos de certificación.







# **Università Degli Studi di Perugia**

**Facoltà di Ingegneria**

**Anno Accademico 2008/2009**

*Messa a punto di una strumentazione di laboratorio per la misura della trasmittanza termica con il metodo della camera calda*

**Relatori:**

**Laureando:**  
**Víctor CALZADILLA**

**Prof. Francesco ASDRUBALI**

**Ing. Giorgio BALDINELLI**

**Ing. Francesco BIANCHI**

*alla mia*  
*Famiglia*

# Indice

<b>Introduzione</b>	17
 <b>Capitolo I: Trasmissione del calore</b>	 20
<b>1.1.- Il calore</b>	20
<b>1.2 .- Conduzione</b>	22
<i>1.2.1.- Gradiente di temperatura</i>	22
<i>1.2.2.- Legge della conduzione – Equazione de Fourier</i>	23
<i>1.2.3.- Conduttività termica dei materiali</i>	26
<b>1.3 .- Convezione</b>	30
<i>1.3.1.- Gli strati limite nella convezione</i>	31
<i>1.3.2.- Valutazione di h con il metodo dell'analisi dimensionale</i>	34
<b>1.4.- Irraggiamento</b>	38
<i>1.4.1.- Introduzione</i>	38
<i>1.4.2.- Proprietà radiative dei corpi</i>	39
<i>1.4.3.- Il corpo nero</i>	41
<i>1.4.4.- Fattori di vista</i>	44
<i>1.4.5.- Scambio di calore tra due superfici nere</i>	45
 <b>Capitolo II: Riferimenti normativi</b>	 47
<b>2.1.- UNI EN ISO 8990: Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario</b>	48
<b>2.2.- UNI EN ISO 12567-1: Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda</b>	52
<i>2.2.1.- Introduzione</i>	52
<i>2.2.2.- Requisiti dell'apparecchiatura di prova</i>	52
<i>2.2.3.- Procedura di prova</i>	55
<b>2.3.- UNI EN 1934: Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro</b>	62
 <b>Capitolo III: Descrizione dell'Hot Box</b>	 65
<b>3.1 .- Pannello di supporto</b>	66
<b>3.2.- Camere di misurazione</b>	69
<b>3.3.- Sistemi di climatizzazione</b>	72
<b>3.4.- Pannello di irridigimento</b>	75

<b>Capitolo IV: Acquisizione ed elaborazione dei dati</b>	77
<b>4.1.- Sensori</b>	77
<b>4.2.- Acquisizione dei dati</b>	80
4.2.1.- <i>Modulo Input Termocoppia a 8 canali per CompactFieldPoint</i>	80
4.2.2.- <i>Blocco connettore isotermico integrato per il collegamento al modulo per termocoppie</i>	81
4.2.3.- <i>Interfaccia Ethernet/Seriale per compactFieldPoint</i>	82
4.2.4.- <i>Potenza inserita nella camera calda</i>	83
<b>4.3.- Elaborazione dei dati</b>	85
4.3.1.- <i>LabVIEW</i>	86
4.3.2.- <i>Programma acquisizione temperature Norma UNI EN 1934</i>	91
4.3.3.- <i>Programma “Calibrazione UNI 12567-1”</i>	94
 <b>Capitolo V: Misura della trasmittanza termica secondo UNI EN 1934</b>	99
<b>5.1.- Strumentazione di misura</b>	100
5.1.1.- <i>Descrizione della strumentazione</i>	100
5.1.2.- <i>Messa in opera della strumentazione</i>	101
<b>5.2.- Risultati</b>	104
5.2.1.- <i>Temperatura dell’aria</i>	104
5.2.2.- <i>Temperatura superficiale</i>	106
5.2.3.- <i>Flusso termico</i>	107
5.2.4.- <i>Individuazione del regime stazionario</i>	108
<b>5.3.- Verifiche di accettabilità e calcolo della resistenza termica</b>	110
 <b>Conclusioni</b>	115
 <b>Bibliografia</b>	117

# Introduzione

Sin dall'antichità lo sviluppo della società è stato strettamente legato alla capacità di utilizzare le risorse naturali in maniera adeguata affinché fossero soddisfatte le necessità degli uomini.

Conviene osservare che qualsiasi attività umana, dalla produzione di un determinato bene in una fattoria, al riscaldamento dell'acqua per uso domestico, comporta l'utilizzo dell'energia. Poiché il suo utilizzo implica generalmente un costo (economico, ambientale, sociale ... ) una società determinata sarà più avanzata per quanto sia a disposizione per farne un uso più responsabile.

Il termine "responsabile" si riferisce all'aumento della efficienza degli sistemi di ottenimento dell'energia (miglioramento dei processi, impiego di fonti energetiche rinnovabili, investigazione su nuovi vettori energetiche come l'idrogeno ...) ma anche ad una diminuzione nel consumo mediante lo studio dei processi e la conseguente limitazione dello spreco energetico.

Tramite lo strumento normativo, i diversi governi o organismi internazionali competenti, possono incentivare il risparmio energetico in tutti i settori dell'attività umana.

Visto che una porzione considerevole dell'energia totale che viene consumata riguarda la climatizzazione degli edifici, sia nel settore commerciale che residenziale, sarà necessaria una legislazione specifica allo scopo di fornire i principi ed i requisiti nella progettazione degli edifici.

In Italia, la normativa di riferimento nel campo del rendimento energetico nell'edilizia è il DLgs 192/05, in conformità con la Direttiva Europea 2002/91/CE . Come indicato nel suo primo articolo, il decreto stabilisce "i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico".

Secondo tale decreto, ogni edificio di nuova costruzione o ristrutturato (eccetto quelli di alto valore storico) dovrà avere la sua certificazione energetica, cioè superare

certi requisiti di isolamento e/o rendimento degli diversi impianti di climatizzazione sia a livello globale che dei singoli componenti.

Un concetto fondamentale per la certificazione energetica degli edifici è quello della *trasmissione termica*. Poichè tutti i singoli elementi per la costruzione dovranno avere trasmissione termica nota e minore di un valore limite funzione della zona climatica, bisognerà disporre di laboratori dove misurare accuratamente questa grandezza e ottenere valori standard per mezzo di prove normalizzate. Tutti i produttori dovranno avere la certificazione di trasmissione termica rilasciata da un laboratorio autorizzato.

Ritenendo questa necessità evidente dell'industria, viene decisa la costruzione nel Laboratorio di Termotecnica dell'Università degli Studi di Perugia di una *camera calda* per la misurazione della trasmissione termica di finestre e porte, conforme a quanto indicato nella norma UNI EN ISO 8990 e più in dettaglio nella UNI EN ISO 12567-1.

Il disegno generale della *HotBox* è stato già oggetto di un lavoro di tesi precedente, sebbene mancassero ancora diversi aspetti tecnici e costruttivi a decidere durante le prime prove della macchina.

Durante la realizzazione di questo lavoro di tesi è stata terminata la costruzione e strumentazione dell'impianto: sistemazione del cavo riscaldante nella camera calda così come delle termocoppie necessarie per la conoscenza delle temperature, scelta del materiale per il pannello di irridigimento in base alla sua emissività, montaggio del sistema di acquisizione dei dati, installazione dei pistoncini ad aria compressa del sistema di fissaggio delle finestre...

Sebbene l'obiettivo iniziale della tesi fosse la calibrazione dell'*HotBox*, non è stato possibile realizzare queste prove per mancanza di tempo. È stato comunque fatto il programma di acquisizione dei dati per le prove di calibrazione secondo la norma UNI EN ISO 12567-1, che permette la monitoraggio "real-time" dell'andamento delle temperature ed il salvataggio dei valori delle diverse variabili per la sua posteriore analisi.

Invece è stata eseguita una prova di misura della resistenza termica secondo la norma UNI EN 1934. I dati sono stati elaborati mediante un programma di LabVIEW

appositamente disegnato per questa norma, simile a quello scritto per le prove di calibrazione. L'analisi dei risultati insieme ai problemi emersi durante l'esecuzione della prova e le soluzioni trovate sono stati un gran aiuto alla proposta di eventuali e alternativi suggerimenti per migliorare in futuro l'efficacia e la precisione dei valori misurati.

# Capitolo I: Trasmissione del calore

## 1.1.- Il calore

Si parla di “calore” come l’energia che si propaga in conseguenza di una differenza di temperatura. È importante sottolineare che il concetto di calore non è quindi legato a un determinato stato di equilibrio dei sistemi ma ad una trasformazione: non appena essa è terminata, il calore cessa di esistere.

Tutti i processi di trasmissione del calore comportano lo scambio e la conversione di energia e devono quindi obbedire al primo e al secondo principio della termodinamica. A prima vista si potrebbe ammettere che i principi della trasmissione del calore possano essere dedotti dalle leggi fondamentali della termodinamica, ma sarebbe un’idea sbagliata perché la termodinamica si limita solo allo studio dei sistemi in equilibrio e sarebbe di scarso aiuto nei processi termici che avvengono in assenza di equilibrio.

Dal punto di vista termodinamico, la quantità di calore scambiata durante un processo è uguale alla somma della variazione di energia interna del sistema e del lavoro compiuto. Un’analisi di questo tipo determina semplicemente la quantità di calore somministrata o sottratta al sistema durante una trasformazione tra determinati stati estremi, ma non considera né il meccanismo di scambio termico né il tempo da esso richiesto.

Per esempio, se noi abbiamo una sbarra calda che si raffredda in una vasca d’acqua, la termodinamica è capace solo di dirci la temperatura finale di equilibrio del sistema acqua-sbarra, ma non può dirci quanto è stato il tempo impiegato per arrivare alla condizione di equilibrio, né può dirci quale sarà la temperatura della sbarra dopo un certo intervallo di tempo prima della condizione di equilibrio.

Mediante le leggi che descrivono la trasmissione del calore si può, invece, calcolare la temperatura della sbarra o dell’acqua in funzione del tempo.

La scienza della trasmissione del calore si occupa di tutto ciò che riguarda sia i valori finali delle diverse grandezze che la maniera come si sviluppa il processo (tempi,



flussi...) mediante appropriate relazioni, teoriche ovvero empiriche, tra il flusso termico, i parametri del sistema (geometria, proprietà fisiche, portate, ecc.), e le condizioni termiche dell'ambiente.

Alla base delle analisi di trasmissione del calore, oltre ai due principi della termodinamica, vi sono leggi di conservazione della massa e della quantità di moto e le relazioni di trasmissione appropriate allo specifico problema: leggi di Fourier, di Newton, di Stefan-Boltzman. Queste ultime tre leggi si riferiscono rispettivamente ai tre diversi meccanismi in cui i fenomeni di trasmissione termica possono essere classificati: conduzione, convezione e irraggiamento. In realtà i primi due meccanismi si basano su gli stessi principi e sono legati alla presenza di massa in movimento nel sistema. La differenza sta nel fatto che la conduzione è associata a moti atomici o molecolari mentre la convezione è legata a moti macroscopici di massa. L'irraggiamento invece è legato a fenomeni di propagazione di onde elettromagnetiche. Per questo motivo lo scambio termico radiativo può avvenire anche nel vuoto. Analizziamo, ora, i singoli meccanismi.

## 1.2 .- Conduzione

La conduzione è il modo di trasmissione del calore legato a processi che avvengono a livello atomico o molecolare. Per avere trasferimento di calore per conduzione bisogna sempre avere l'esistenza di un mezzo materiale (a differenza dell'irraggiamento, come vedremo più avanti). A seconda della struttura fisica del corpo, esistono diversi tipi di meccanismi per i quali viene trasferita l'energia.

La conduzione termica nei gas è dovuta alla diffusione atomica e molecolare, mentre nei liquidi e nei solidi dielettrici avviene per mezzo di onde elastiche. Nei metalli il fenomeno è principalmente dovuto alla diffusione degli elettroni liberi, risultando di minore importanza l'effetto della oscillazione elastica della struttura.

### 1.2.1.- Gradiente di temperatura

Se si congiungono tutti i punti di un corpo che hanno la stessa temperatura, si trova una superficie isoterma. Dette superfici non si intersecano mai, perché un punto di un corpo, non può avere simultaneamente temperature diverse. La figura 1.1 rappresenta delle isoterme che differiscono in temperatura di ( $\Delta T$ ).

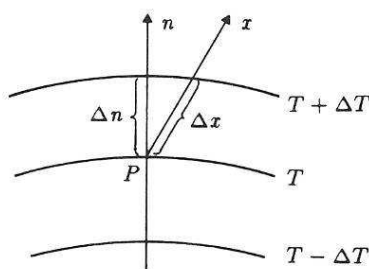


Fig 1.1.- Gradiente di temperatura

La temperatura di un corpo varia quindi solo nelle direzioni trasversali alle superfici isoterme e la maggiore differenza di temperatura per unità di lunghezza è osservata nella direzione normale alla superficie isoterma. L'aumento di temperatura riferito all'unità di lunghezza in questa direzione viene chiamato gradiente di temperatura.

Il gradiente, quindi, è un vettore normale alla superficie isoterma, il cui modulo è uguale al valore assoluto della derivata normale ed il cui verso è quello delle temperatura crescenti

$$\text{grad}T = \frac{dT}{dn} \cdot \vec{n} \quad (1.1)$$

Se è data una certa regione S si dice che in essa è definito il campo di temperatura, quando la temperatura è funzione dei punti P di essa ovvero delle coordinate  $x, y, z$  dello stesso punto. Si scrive allora:

$$T = T(P) = T(x, y, z) \quad (1.2)$$

In coordinate cartesiane il gradiente ammette un'espressione molto semplice:

$$\text{grad}T = \frac{dT}{dn} \cdot \vec{n} = \frac{dT}{dx} \cdot \vec{i} + \frac{dT}{dy} \cdot \vec{j} + \frac{dT}{dz} \cdot \vec{k}; \quad (1.3)$$

dove  $i, j, k$  sono i versori degli assi  $x, y, z$

### 1.2.2.- Legge della conduzione – Equazione de Fourier

L'esperienza ha dimostrato che, se esiste un gradiente di temperatura in un corpo, il calore fluisce dalla regione a temperatura maggiore verso la regione a temperatura minore.

Per conduzione l'energia si trasmette per contatto diretto tra le molecole senza che esse si spostino sensibilmente. Quando le molecole di una regione acquistano una energia cinetica di vibrazione molecolare maggiore di quella delle molecole di una regione adiacente a causa di una differenza di temperatura, le molecole aventi maggiore energia cedono parte di questa alle molecole della regione a temperatura minore. Lo scambio di energia avviene per diffusione nei gas; per urto elastico nei fluidi e solidi non metallici, e per diffusione di elettroni liberi nei metalli.

La relazione fondamentale della trasmissione del calore per conduzione fu proposta da Fourier come generalizzazione dei risultati sperimentali. Essa afferma che la potenza

termica per unità di area trasmessa per conduzione in un materiale è proporzionale in ogni istante al gradiente di temperatura:

$$\frac{\Phi}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial n}; \quad (1.4)$$

Introducendo la costante di proporzionalità si ha:

$$\Phi = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial n}; \quad (1.5)$$

dove  $\Phi$  è la potenza termica espressa in Watt e il segno meno indica che il flusso di calore si muove nella direzione della temperatura decrescente.

Il fattore di proporzionalità  $k$ , denominato conduttività termica, è una proprietà dei materiali, dipendente dalla temperatura e dalla pressione, che viene misurata in laboratorio sui campioni dei mezzi interessati. Essa può essere costante per tutto il materiale e tutte le direzioni (materiali isotropi) oppure essere funzione della direzione di propagazione del calore. In questo caso (materiali anisotropi) il flusso di calore non necessariamente deve essere parallelo al gradiente di temperatura.

In sistemi nei quali la trasmissione del calore avviene per conduzione monodirezionale, la equazione (1.5) diventa:

$$\Phi = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (1.6)$$

Se si è in regime stazionario l'andamento della temperatura può essere ricavato dalla (1.6) direttamente. Se però la temperatura del corpo varia col tempo o se c'è generazione di calore entro il corpo, il problema diventa più complesso.

Attraverso il bilancio di energia su un elemento di volume infinitesimo  $dV = dx \, dy \, dz$ , si arriva all'equazione generale per i problemi di conduzione.

*“Quantità di calore entrante + quantità di calore prodotta all’interno = variazione del contenuto d’energia interna + quantità di calore uscente”*

Omettendo l’intera dimostrazione si arriva a la seguente equazione:

$$k \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1.7)$$

Dove  $\dot{q}$  è il calore generato dall’unità di volume, espressa in  $\text{W/m}^3$ ,  $c$  è il calore specifico in  $\text{J/kg}$  e  $k$  la conduttività termica (considerata costante).

A questo punto se viene introdotta la costante *diffusività termica*  $\alpha = k / \rho c$  l’equazione 1.7 diventa:

$$\alpha \cdot \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1.8)$$

La diffusività termica  $\alpha$  è un rapporto tra la velocità di trasmissione del calore e l’inerzia termica di questo mezzo, cioè ci permette di conoscere il tempo nel quale una perturbazione nelle condizioni di contorno sulla superficie è sentita all’interno del mezzo. La velocità con la quale una variazione di temperatura sulla superficie del sistema si propaga al suo interno aumenta in modo direttamente proporzionale alla diffusività.

Nel campo edilizio in condizioni invernali, per esempio, la scelta di  $\alpha$  dipende dall’utilizzo della casa. Infatti se considero  $k$  costante, aumentando il termine  $\rho c$ , che significa fondamentalmente utilizzare tamponature più pesanti, diminuisco  $\alpha$ . In questo modo aumento il tempo del transitorio; aumento, cioè, il tempo che impiego per portare a regime la temperatura all’interno. Ma, così, rendo anche più lento il raffreddamento, favorendo il sistema di controllo dell’impianto di riscaldamento.

Se uso tamponature leggere avviene, ovviamente il contrario.

Pertanto, se l’abitazione è abitata saltuariamente, come avviene nelle case per le vacanze, conviene utilizzare tamponature leggere per ridurre il tempo necessario a portare in temperatura l’ambiente.

### 1.2.3.- Conduttività termica dei materiali

La conduttività termica è una proprietà termofisica della materia. Il suo valore è, quindi, strettamente legato alla struttura atomica del materiale. In termini generali si può affermare che il suo valore diminuisce passando dai solidi conduttori, alle leghe, ai liquidi e ai gas.

È bene aggiungere, però, che i fluidi devono essere macroscopicamente fermi, altrimenti si innescano i meccanismi propri della convezione.

Nei solidi la conduttività dipende sia dal movimento degli elettroni liberi, sia dalle vibrazioni del reticolo cristallino.

La prima componente si origina in quanto questi elettroni, muovendosi attraverso la struttura del reticolo, trasportano oltre alla carica elettrica anche energia. La seconda è più correttamente rappresentata introducendo il concetto dei fononi, onde elastiche stazionarie che attraversano il materiale alla velocità del suono.

Nei materiali conduttori l'apporto alla conduttività degli elettroni liberi è preponderante rispetto alle vibrazioni del reticolo (di solito due ordini di grandezza superiore); nelle leghe e semiconduttori, che contengono un numero limitato di elettroni liberi, i due apporti diventano comparabili e conseguentemente la conduttività minore. Così la conduttività può esprimersi nella forma:

$k = k_e + k_{fo}$ , in cui  $k_e$  e  $k_{fo}$  denotano le componenti elettronica e fononica della conduttività termica.

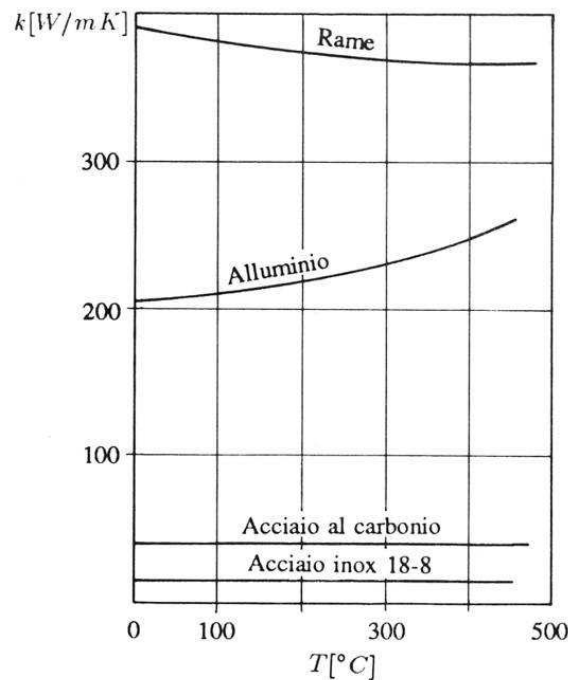
Nei materiali non metallici l'apporto principale alla conduttività termica è dato dalle vibrazioni del reticolo; il valore di  $k$  aumenta con la purezza. Questo spiega perché il quarzo ha una conduttività termica ben più alta del vetro. Il diamante, per esempio, avendo una struttura reticolare molto ordinata presenta una conduttività termica molto alta, superiore anche ai migliori metalli puri.

Nei materiali isolanti generalmente usati in edilizia, la trasmissione del calore dipende da numerosi fattori, legati sia al materiale, sia alla struttura. I principali sono:

- La conduttività del materiale

- La densità apparente del materiale, espressa come rapporto tra la massa e il volume effettivo della struttura. Questo parametro tiene conto in buona sostanza della presenza di aria all'interno della struttura, che ovviamente interviene anch'essa ad aumentare l'effetto di isolamento.
- Le proprietà radiative della superficie.

I valori di conduttività termica di alcuni metalli sono riportati in Fig 1.2



*Fig 1.2 Conduttività termica di alcuni metalli  
in funzione della temperatura*

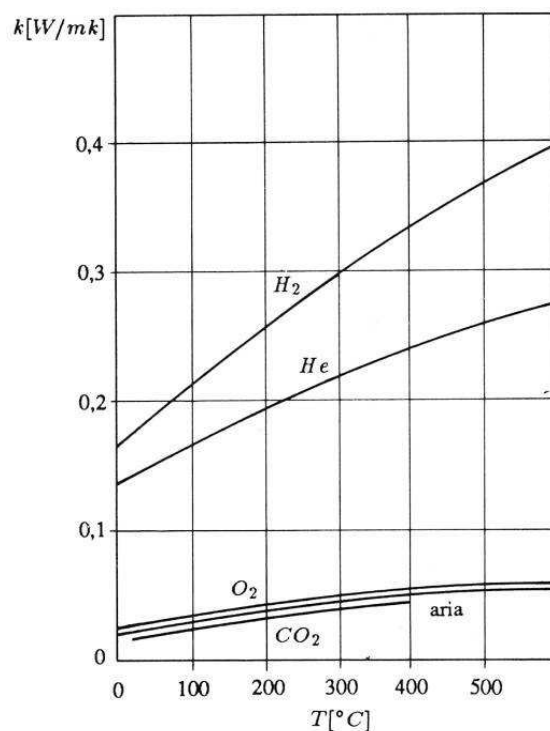
Secondo la teoria cinetica la trasmissione del calore per conduzione nei gas, avviene attraverso il trasporto di energia cinetica che accompagna il movimento molecolare ed è a questa che dobbiamo rivolgerci per ottenere i valori di  $k$ .

Esso dipende dal trasferimento di energia tra le particelle “più calde” a quelle “più fredde”, che avviene negli urti. Il numero degli urti e, quindi, la conduttività termica

risultano essere proporzionale al numero di particelle per unità di volume, la velocità media molecolare e il cammino libero medio.

Poiché il numero di particelle/volume è proporzionale alla pressione del sistema, mentre il cammino medio è inversamente proporzionale ad essa, si ricava che la conduttività dipende molto poco dalla pressione.

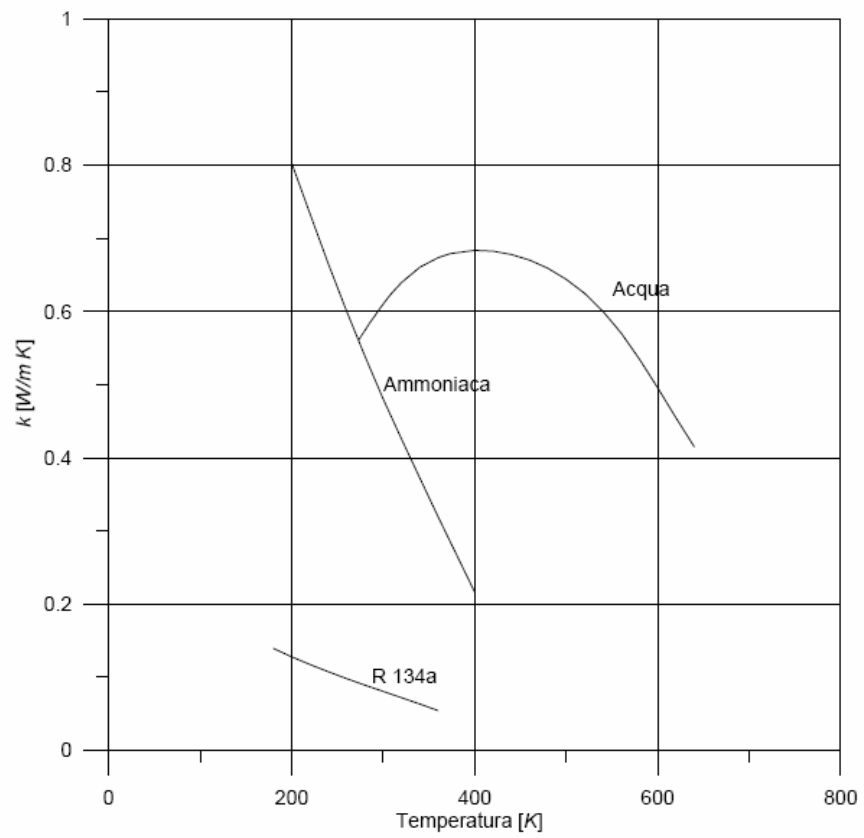
Inoltre, poiché la velocità media aumenta con la temperatura e diminuisce con la massa molecolare la conduttività termica avrà lo stesso comportamento. Questa dipendenza con la temperatura si vede nella seguente figura.



*Fig 1.2 Conduttività termica di alcuni gas  
in funzione della temperatura*

Nei liquidi la situazione è molto più complessa e non ancora compresa, nonostante sappiamo che la conduttività è minore se la compariamo con quella dei solidi. Questo succede perché in seguito alla fusione, la struttura del reticolo di un solido cristallino, si disgrega e, conseguentemente, si riduce il contributo fononico alla conduttività, dovuto al trasporto per vibrazioni. La conduttività termica di alcuni liquidi, in funzione della temperatura è indicata in Fig 1.3





*Fig 1.3 Conduttività termica di alcuni liquidi  
in funzione della temperatura*

### 1.3 .- Convezione

La convezione termica si riferisce allo studio dello scambio termico che avviene tra una superficie solida ed un fluido a contatto con la superficie.

In un mezzo la cui temperatura non sia uniforme, anche la densità assume valori diversi da zona a zona a causa della dilatazione termica; se il mezzo è un fluido, le forze gravitazionali provocano continui movimenti, denominati *correnti convettive*, che portano a contatto parti della massa fluida che si trovano a differenti temperature, e ne provocano la miscelazione, favorendo così la trasmissione del calore. Il fenomeno prende il nome di trasmissione di calore per *convezione naturale*.

Oltre ai moti convettivi naturali, si possono stabilire in un fluido anche dei movimenti convettivi direttamente generati da cause meccaniche, ad esempio mediante una pompa o un ventilatore. Si parla in questo caso di *convezione forzata*.

La convezione è un fenomeno più complesso della conduzione, in quanto oltre a dipendere dalle proprietà termofisiche del fluido e dalle condizioni al contorno imposte sulla superficie del solido, dipende fondamentalmente dalle caratteristiche del moto, vale a dire dalla geometria del sistema, dal tipo di moto (laminare o turbolento), da come è generata la velocità del fluido (convezione forzata o naturale).

Questo significa che oltre all'equazione dell'energia bisogna risolvere anche l'equazione di continuità e quella della quantità di moto.

La risoluzione analitica di queste equazioni è molto complessa e spesso impossibile. Si ricorre, allora, all'introduzione del *coefficiente convettivo*  $h$ , la cui utilizzazione trasferisce le difficoltà della risoluzione del problema alla valutazione di questo parametro. Adesso, il flusso termico tra parete e fluido dipende linearmente della differenza tra le temperature, essendo  $h$  il fattore di proporzionalità.

Se considerassimo uno strato di fluido di spessore  $L$ , in moto rispetto ad una parete solida, tra cui esiste una differenza di temperatura ( $T_p - T_\infty$ ). Il flusso termico per unità di area potrebbe venire espresso, facendo uso del coefficiente convettivo, secondo la seguente equazione:

$$q'' = h \cdot (T_p - T_\infty) \quad (1.9)$$

Come vedremo più avanti, si farà uso dei metodi di analisi dimensionale per la valutazione di  $h$ , i cui insieme a la sperimentazione pratica ci daranno la possibilità di ottenere il valore del coefficiente convettivo di ogni problema particolare.

Prima di andare avanti nel studio del nostro problema, diamo uno sguardo al contatto fluido-parete.

### *1.3.1.- Gli strati limite nella convezione*

#### *Strato limite di velocità*

Per capire il concetto di strato limite di velocità consideriamo il moto di un fluido su una lastra piana come è indicato in Fig. 1.4. Quando le particelle fluide entrano in contatto con la superficie della lastra, vengono arrestate e la loro velocità si riduce a zero. Queste particelle quindi rallentano il moto di quelle degli strati fluidi sovrastanti, che a loro volta interagiscono con il moto delle particelle degli strati fluidi superiori, e così via fino a che ad una distanza  $y = \delta$  dalla superficie l'effetto diventa trascurabile. L'azione di rallentamento del moto del fluido è associata con lo sforzo tangenziale  $F_t$  agente su piani paralleli alla velocità del fluido. All'aumentare della distanza  $y$  dalla superficie la componente  $u$  di velocità del fluido nella direzione  $x$  deve quindi aumentare finché raggiunge il valore  $u_\infty$  della corrente indisturbata.

Con la grandezza  $\delta$  viene indicato lo *spessore dello strato limite* che è formalmente definito come il valore di  $y$  per il quale  $u = 0.99u_\infty$ . Il modo con cui la velocità  $u$  varia con  $y$  nello strato limite viene indicato come profilo della velocità nello strato limite. In conseguenza il moto del fluido è caratterizzato da due distinte regioni: uno strato sottile (lo strato limite) in cui il gradiente di velocità e gli sforzi tangenziali sono rilevanti, ed una regione oltre lo strato limite in cui i gradienti di velocità e gli sforzi tangenziali sono trascurabili.

All'aumentare della distanza  $x$  dal bordo della lastra, gli effetti viscosi penetrano sempre di più all'interno della corrente libera cosicché lo spessore dello strato limite  $\delta$  cresce all'aumentare di  $x$ .

Lo strato limite descritto è denominato più specificatamente *strato limite di velocità*. Esso si sviluppa ogni volta che un fluido si muove su di una superficie ed è di fondamentale importanza nei problemi riguardanti il trasporto convettivo. Il suo significato è legato allo sforzo tangenziale alla parete  $F_t$  e quindi agli effetti di attrito superficiale.

Lo strato limite di velocità può essere *laminare* o *turbolento* (eccettuando un piccolissimo sottostrato laminare, vicino alla parete) a secondo del numero de Reynolds del problema, cioè, del rapporto tra le forze inerziali e quelle dovute alla viscosità del fluido. Valori del numero de Reynolds elevati, vanno associati a movimento turbolento (flusso disorganizzato, con grande capacità di mescolamento e, quindi, di trasmissione del calore) mentre un Re basso è caratteristico del movimento laminare (ordinato) e di un *coefficiente convettivo h* minore.

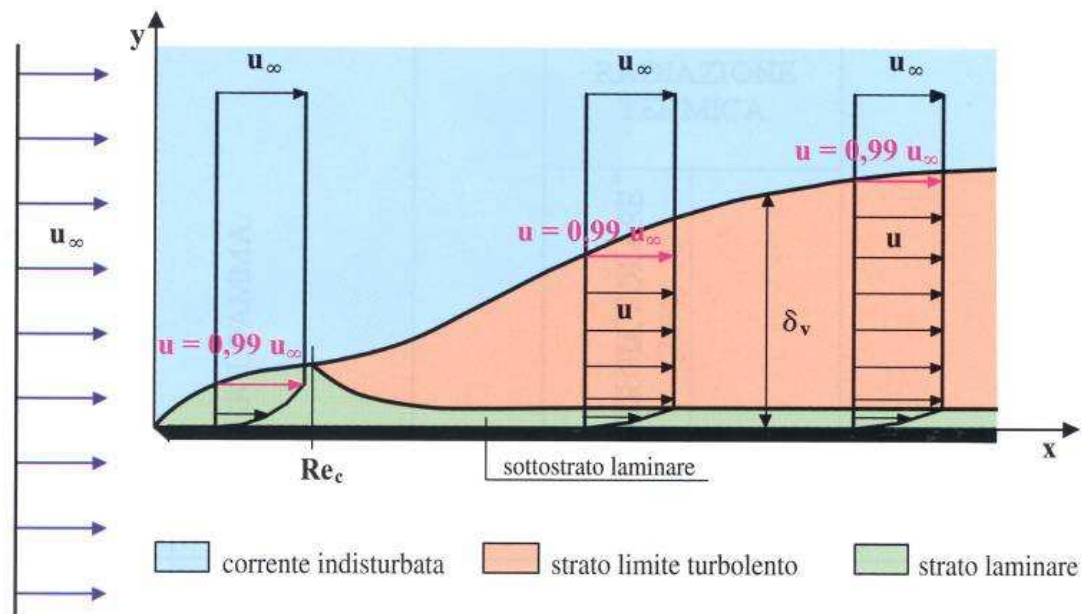


Fig 1.4.- Strato limite di velocità su una lastra piana

#### Strato limite termico

In conseguenza di una differenza di temperatura tra la corrente fluida e la superficie della parete, si sviluppa uno strato limite termico analogamente allo strato limite di velocità. Consideriamo ancora il moto di un fluido su di una superficie piana (Fig 1.5); in corrispondenza del bordo, il profilo di temperatura è uniforme con  $T = T_{\infty}$ . Tuttavia le particelle fluide che vengono in contatto con la lastra si portano in equilibrio con la temperatura della superficie. A loro volta queste particelle scambiano energia con quelle degli strati fluidi adiacenti e si sviluppa così il gradiente di temperatura nel fluido.

La regione di fluido in cui è presente un gradiente di temperatura è denominata *strato limite termico* ed il suo spessore  $\delta_t$  è definito come il valore di  $y$  a cui il rapporto

$$(T_y - T_{\infty}) / (T_p - T_{\infty}) = 0.99 \quad (1.10)$$

All'aumentare della distanza  $x$  dal bordo della lastra, gli effetti dello scambio termico penetrano sempre di più nella corrente indisturbata e lo spessore dello strato limite termico aumenta.

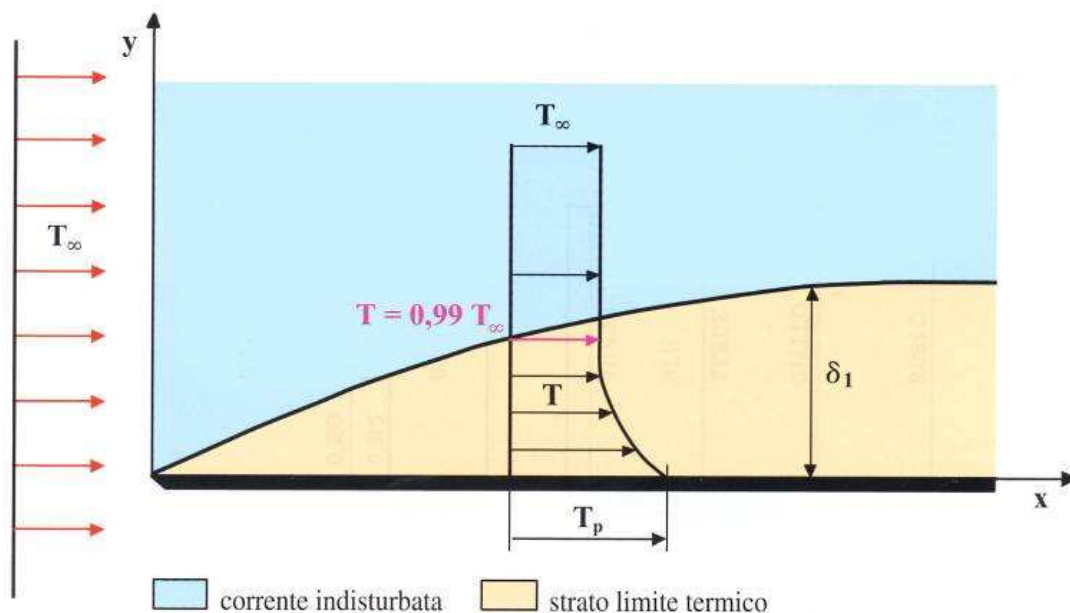
Dalla conoscenza del gradiente di temperatura alla parete è possibile valutare il flusso termico locale applicando:

$$q'' = -k \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (1.11)$$

in quanto sulla superficie non vi è scorrimento, come è stato indicato nella discussione dello strato limite di velocità, e lo scambio di energia può avvenire solo per conduzione (in assenza di fenomeni radiativi).

Ne consegue che le condizioni di moto nello strato limite termico, influenzano direttamente il gradiente di temperatura nella parete e determinano quindi il flusso di calore attraverso lo strato limite.

Si noti infine che, nei casi in cui  $(T_p - T_\infty)$  è costante ed indipendente da  $x$ , all'aumentare dello spessore  $\delta_t$  dello strato limite il gradiente di temperatura nello strato diminuisce. Quindi anche lo farà il gradiente nella parete e in conseguenza sia il flusso locale  $q''$ , sia il coefficiente di scambio  $h$  diminuiscono all'aumentare di  $x$ .



*Fig 1.5.- Strato limite termico su una lastra piana*

### 1.3.2.- Valutazione di $h$ con il metodo dell'analisi dimensionale

L'analisi dimensionale è un metodo generale della Fisica che consente di ridurre il numero dei parametri che intervengono nella risoluzione di un certo problema e, soprattutto, di permettere l'utilizzazione sistematica ed estesa dei risultati di carattere sperimentale.

Secondo il *teorema de Buckingham*:

- Ogni legge fisica può essere espressa per mezzo di una relazione fra parametri adimensionali;
- il numero  $n$  di questi parametri è pari alla differenza tra il numero di grandezze fisiche indipendenti  $p$  da cui dipende il fenomeno, meno il numero  $f$  di grandezze fisiche fondamentali necessarie per definire il sistema di unità fisiche adottato.

$$n = p - f \quad (1.12)$$

Adesso cercheremo di trovare quali sono le grandezze fisiche indipendenti  $p$  che sono presenti nel nostro problema.

Desideriamo conoscere il *coefficiente convettivo*  $h$  (1). Non è difficile immaginare che la *conduttività termica del fluido*  $\lambda$  (2) sarà un parametro importante. Infatti lo strato laminare ha un comportamento equivalente a quello di un solido e la trasmissione del calore avverrà per conduzione.

Il trasferimento di calore dipende dal moto del fluido, che può essere laminare o turbolento a seconda della relazione tra la *densità*  $\rho$  (3), la *viscosità dinamica*  $\mu$  (4) e la *velocità del fluido*  $u$  (5). In questo senso, nei problemi di convezione naturale, il moto del fluido è causato per variazioni di densità, cioè, dovremo considerare la partecipazione del *coefficiente di dilatazione cubica*  $\alpha$  (6) nel problema.

Fuori dello strato limite, la maggior parte della trasmissione del calore è dovuta al trasferimento di massa, quindi la potenza di scambio termico dipende sia della quantità di massa (densità, velocità,...) sia di quanto calore è in grado di trasportare con sé l'elemento di massa di fluido. Il *calore specifico*  $\gamma$  (7) è un'altra grandezza del problema.

In qualunque problema fisico c'è l'influenza delle dimensioni del sistema  $l$  (8).

Per ultimo, nella prima pagina di questa introduzione teorica viene definito il “calore” come “l’energia che si propaga a conseguenza di una differenza di temperatura”. Quindi, l’ultima grandezza del problema sarà una *differenza di temperatura*  $\theta$  (9).

Nel nostro caso:

$$F(h, \lambda, \rho, \mu, u, a, \gamma, l, \theta) = 0 \quad (1.13)$$

Nella 1.13 il numero di parametri è  $p = 9$ , il numero di grandezze fondamentali necessarie per definire il sistema di unità fisico è  $f = 5$ : lunghezza, massa, tempo, temperatura e quantità di calore; perciò:  $n = 9 - 5 = 4$

Secondo il teorema di Buckingham, il nostro problema può esprimersi attraverso una  $F'$  di *quattro parametri adimensionali*. Il numero di parametri adimensionali tra i quali si può scegliere è abbastanza grande, ma di solito si usano questi quattro:

*numero di Reynolds:*

$$Re = \frac{\rho u l}{\mu} \quad (1.14)$$

*numero di Grashof:*

$$Gr = \frac{a g \theta^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (1.15)$$

*numero di Prandtl:*

$$Pr = \frac{\eta \mu}{\lambda} \quad (1.16)$$

Abbiamo già definito tre parametri adimensionali, ma nella loro definizione non viene incluso il coefficiente convettivo.

Com’è stato detto prima, il flusso termico convettivo si può valutare attraverso l’equazione (1.9). Se lo strato di fluido fosse immobile, il flusso termico sarebbe trasmesso interamente per conduzione attraverso lo strato:

$$q'' = \frac{k}{L} \cdot (T_p - T_\infty) \quad (1.17)$$

Si definisce il numero di Nusselt, come il rapporto tra il flusso convettivo e quello conduttivo:

$$Nu = \frac{q''(\text{convettivo})}{q''(\text{conduttivo})} = \frac{hL(T_p - T_\infty)}{k(T_p - T_\infty)} = \frac{hL}{k} \quad (1.18)$$

Nei materiali di uso isolante in edilizia, come ad esempio finestre a doppio vetro, l'obiettivo sarà di avere nell'intercapedine d'aria valori dei Nu dell'ordine dell'unità, cioè, trasmissione convettiva poco efficiente, dell'ordine della conduttiva (come abbiamo visto prima, sempre bassa per i gas).

Invece, cercheremo Nu maggiori quando lo scopo sarà l'aumento della trasmissione del calore, come succede nei scambiatori di calore industriali o nei termosifoni. In questi casi, per aumentare il trasferimento di calore, è raccomandabile che il moto del fluido all'interno dei tubi sia turbolento.

In conclusione, in base al teorema di Buckingham, la (1.13) si può scrivere:

$$F'(Re, Nu, Gr, Pr) = 0 \quad (1.19)$$

Questa relazione è equivalente a quella di prima, ma comporta una notevole semplificazione del problema, sia dal punto di vista della trattazione analitica sia, soprattutto, della utilizzabilità dei risultati sperimentali.

Adesso facciamo attenzione alle condizioni particolari di ogni problema, per trovare informazioni che consentono di ridurre a tre, e talvolta a due soltanto, il numero dei parametri indipendenti che occorre portare effettivamente in conto.

- Nei problemi di convezione forzata, è in generale lecito trascurare l'effetto della gravità rispetto ai moti imposti. Ne segue che il valore del numero di Grashof ha scarsa importanza, in paragone con il numero di Reynolds.

$$Nu = F(Re, Pr)$$

- Nella convezione naturale, la velocità non è una variabile indipendente e non lo è neppure  $Re$ .

$$Nu = F(Gr, Pr)$$



- Quando il fluido è un gas, il numero di Prandtl risulta assai poco variabile da un gas all'altro (varia poco anche con la temperatura). Pertanto tale numero può non essere considerato come una variabile.

Quando il fluido è un gas, la risoluzione del problema comporta l'uso soltanto di due parametri  $Nu-Re$  (c.forzata) ovvero  $Nu-Gr$  (c.naturale), quindi si possono usare diagrammi cartesiani, interpolando poi i vari punti sperimentali con una curva, che rappresenta la legge del fenomeno in esame.

## 1.4.- Irraggiamento

### 1.4.1.- Introduzione

A differenza della conduzione e della convezione lo scambio termico radiativo non richiede la presenza di massa tra i sistemi che scambiano energia.

La sua importanza è notevole, non solo in problemi ambientali, sia su piccola, sia su grande scala, ma anche in numerosi processi industriali di riscaldamento, raffreddamento, essiccazione e nei sistemi di conversione dell'energia, caratterizzati dall'utilizzo di combustibili fossili o dall'impiego dell'energia solare.

Ogni corpo emette radiazione termica. Il meccanismo è legato alla transizione degli elettroni da uno stato quantico ad un altro.

L'emissione, essendo legata allo stato della materia, non può che avere caratteristiche volumetriche.

Tale fatto è ben evidente nei gas e nei solidi semitrasparenti come il vetro. Se il corpo è opaco, come accade nella maggior parte dei solidi e dei liquidi, la radiazione emessa dalle molecole più interne è fortemente assorbita dalle molecole circostanti. Pertanto la radiazione emessa da questi corpi è quella originata dalle molecole poste entro la distanza di circa  $1\ \mu\text{m}$  dalla superficie esterna. Per tale motivo si può ritenere che il fenomeno sia legato alle caratteristiche superficiali del corpo.

Il problema della valutazione dell'energia emessa per irraggiamento non è banale, in quanto le caratteristiche radiative sono legate, sia alla lunghezza d'onda d'emissione, sia alla direzione in cui il corpo emette. La lunghezza d'onda  $\lambda$  è legata alla frequenza  $\nu$  tramite la relazione:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.20)$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel mezzo. Nel vuoto  $c_0 = 2,998 \times 10^8\ \text{m/s}$  e in un mezzo avente un indice di rifrazione  $n$ ,  $c = \frac{c_0}{n}$ .

Il campo di lunghezza d'onda che interessa la radiazione termica comprende parte degli ultravioletti (UV), tutta la banda del visibile ( $0,4\text{-}0,7\ \mu\text{m}$ ) e tutto l'infrarosso. Il campo è quindi compreso tra  $0,1\ \mu\text{m}$  e  $100\ \mu\text{m}$ .

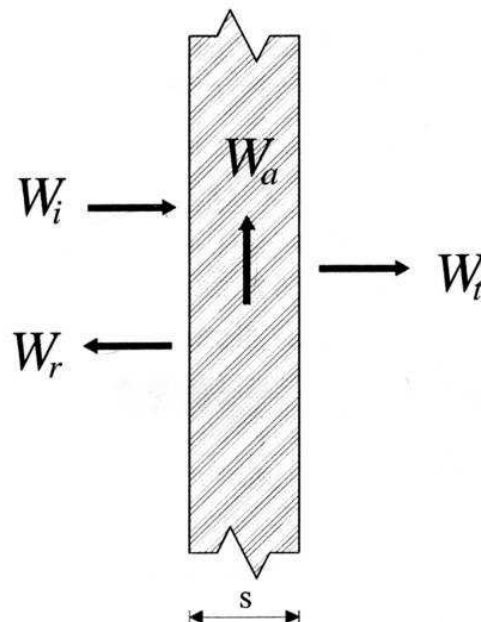
Inoltre bisogna considerare che una superficie reale riflette anche parte dell'energia che riceve dal campo circostante, che si somma a quella emessa. Chiameremo questa grandezza radiosità. Ora, dato che le caratteristiche di riflessione, assorbimento e trasmissione di un corpo dipendono dalla direzione e dalla lunghezza d'onda, anche la radiosità dipenderà da queste variabili. Da queste osservazioni si vede che le caratteristiche dell'energia effettivamente emessa da una superficie reale dipendono sia dalla superficie, sia dal campo circostante.

Il calore netto scambiato tra due superfici è uguale alla differenza tra l'energia emessa e quella ricevuta dal corpo. Per poterlo valutare vi è un problema: non tutta l'energia emessa da una superficie incide sull'altra. Saremo costretti, quindi, ad introdurre un coefficiente, definito fattore di vista, che tiene conto di questo fatto.

Da queste brevissime note si comprende la complessità del problema. Dovremo ricorrere a dei modelli per la risoluzione finale del problema.

#### *1.4.2.- Proprietà radiative dei corpi*

Se una potenza raggiante  $W_i$  incide su di un corpo, una frazione  $W_a$  della potenza è assorbita dalla parete; un'altra  $W_r$  è riflessa e una terza  $W_t$  attraversa il corpo (Figura 1.6).



*Figura 1.6: Bilancio termico di un corpo sottoposto ad un flusso di energia raggiante*

In base al principio di conservazione dell'energia possiamo scrivere il seguente bilancio:

$$W_i = W_a + W_r + W_t \quad (1.21)$$

Dividendo tutto per la potenza incidente ottengo rispettivamente i coefficienti di assorbimento, di riflessione e di trasmissione e la relazione si trasforma nella forma:

$$a + r + t = 1 \quad (1.22)$$

I coefficienti appena visti determinano le caratteristiche della superficie; in particolare i parametri di assorbimento e riflessione, decidono il colore dell'oggetto. Il fenomeno della riflessione è influenzato dalla condizione della superficie; infatti si possono avere come casi limite, una riflessione speculare o una riflessione diffusa. La caratteristica della superficie per cui si verifica o l'uno o l'altro tipo di riflessione è la rugosità della superficie. Se la dimensione della rugosità è grande rispetto alla lunghezza d'onda (maggiore di  $2l$ ) le radiazioni incidenti tendono a riflettersi in tutte le direzioni originando un comportamento diffuso. Se invece si ha una rugosità di piccole dimensioni si può considerare la superficie liscia, così che la radiazione si riflette in maniera speculare (Figura 1.7).

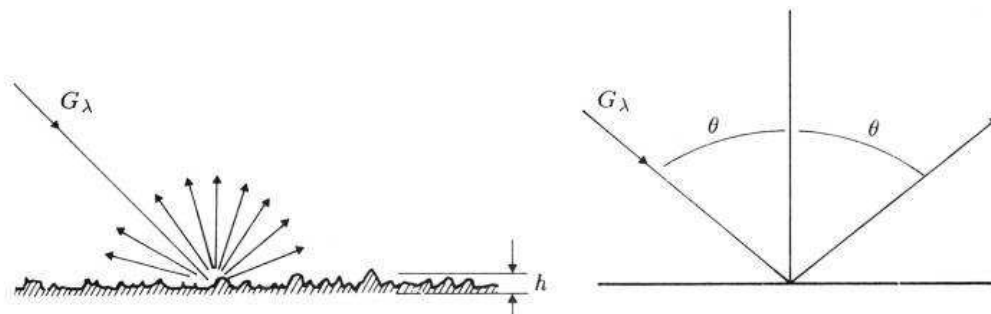


Figura 1.7: Caratteristiche di riflessione di superfici rugose

Particolare attenzione va posta per le superfici selettive. Una superficie si dice selettiva se presenta un comportamento all'assorbimento e alla riflessione notevolmente diverso nei diversi campi di lunghezza d'onda della radiazione incidente. Il vetro è una tipica superficie selettiva poiché, come è noto, è trasparente alle radiazioni visibili e del primo infrarosso, mentre è opaco per le radiazioni a più elevata lunghezza d'onda.

Queste proprietà del vetro, che lo caratterizzano come un materiale semitrasparente, danno origine al ben conosciuto "effetto serra" in relazione alla radiazione solare.

### 1.4.3.- Il corpo nero

Definiamo corpo nero come un corpo che presenta le seguenti caratteristiche:

- Il corpo nero assorbe tutta la radiazione incidente.
- Per ogni temperatura e lunghezza d'onda assegnata, nessuna superficie può emettere più di un corpo nero.
- Il corpo nero è un emettitore diffuso, il che significa che l'emissione non è funzione della direzione.

Il potere emissivo monocromatico,  $E_\lambda$ , è definito come la potenza radiattiva di lunghezza d'onda  $\lambda$ , emesso in tutte le direzioni da una superficie, per unità di intervallo  $d\lambda$  e per unità d'area.

La *legge di Planck* esprime come varia il potere emissivo monocromatico di corpo nero al variare della temperatura assoluta e della lunghezza d'onda.

Tralasciamo la formula che tutto sommato per le nostre esigenze può dire poco ed analizziamo piuttosto la sua rappresentazione grafica riprodotta in Figura 1.8

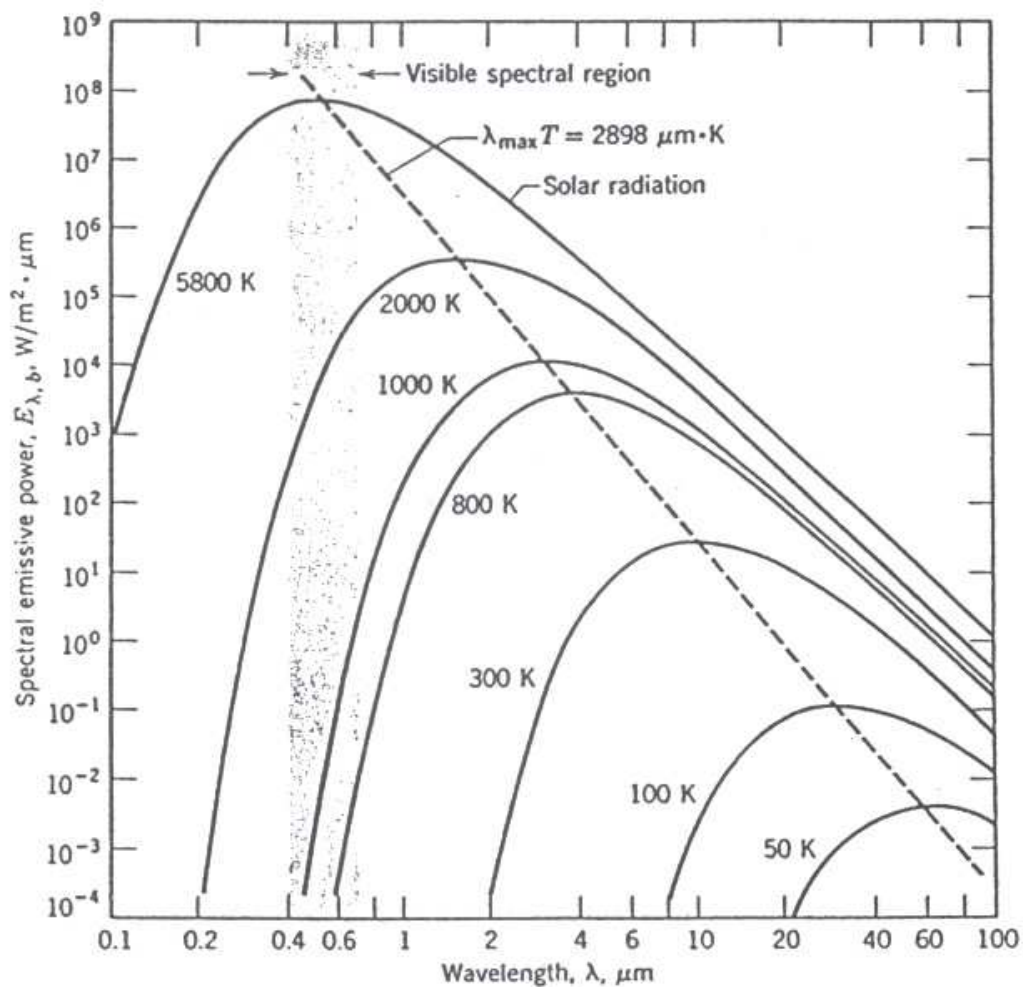


Figura 1.8: la legge di Planck

Osservando la figura si possono fare le seguenti osservazioni:

- Fissata la lunghezza d'onda, il valore della radiazione emessa cresce all'aumentare della temperatura.
- All'aumentare della temperatura il corpo nero tende ad emettere a lunghezze d'onda minori.
- Il sole si può considerare come un corpo nero che emette alla temperatura di 5800 K. Si potrebbe dimostrare che circa il 50% dell'energia emessa dal sole cade nel campo del visibile.

Da notare che il grafico di Figura 1.8 è log-log.

Dall'analisi della Figura 1.8, si può ricavare una spiegazione qualitativa dell'effetto serra. Immaginiamo di considerare una serra completamente vetrata. Come tutti i materiali anche il comportamento del vetro dipende dalla lunghezza d'onda dell'energia

incidente. Il vetro è opaco agli ultravioletti e invece lascia passare tutto il visibile e parte dell'infrarosso fino alla lunghezza d'onda di circa  $2\text{ }\mu\text{m}$ .

È questo il motivo per cui noi la vediamo trasparente. Visto che il sole si comporta circa come un corpo nero a  $5800\text{ K}$ , il vetro lascia passare più del 50% dell'energia incidente. Questa energia riscalderà il terreno all'interno della serra che a sua volta riemetterà energia. Solo che il terreno, che per nostra comodità in questo ragionamento supporremo un corpo nero (anche se non è vero), emetterà ad una temperatura molto più bassa, supponiamo dell'ordine dei  $300\text{ K}$ . Se analizziamo il grafico della Figura 4-2, vediamo che un corpo nero alla temperatura di  $300\text{ K}$  emette energia per lunghezze d'onda superiori ai  $2\text{ }\mu\text{m}$ . Siamo quindi nel campo in cui il vetro si comporta come un corpo opaco; pertanto l'energia che il terreno emette sarà in parte riflessa dalla struttura e tornerà a riscaldare l'ambiente.

A livello terrestre il ragionamento è analogo. Esistono alcuni gas, detti gas serra, che risultano circa trasparenti all'irraggiamento solare, ma che riflettono in parte le radiazioni emesse dalla terra, non permettendone così il raffreddamento.

Come si vede nella figura 1.9, il potere emissivo monocromatico del corpo nero ha un massimo e la lunghezza d'onda,  $\lambda_m$ , a cui corrisponde questo massimo dipende della temperatura come espiega la seguente equazione:

$$\lambda_m T = 2897,6\text{ }\mu\text{m K} \quad (1.23)$$

Se volessi conoscere il potere emissivo globale, cioè la potenza emessa per unità d'area su tutto lo spettro e per ogni direzione, mi basterebbe integrare su tutto il campo di frequenza il potere emissivo monocromatico.

Per il corpo nero, quindi, dovrei integrare la legge di Planck su tutto lo spettro di frequenze. Facendo questa operazione ottengo la *legge di Stefan-Boltzmann*:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1.24)$$

dove:

$E_b$  è il potere emissivo globale di corpo nero, espresso in  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

$\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann che vale:  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ .

L'energia emessa dai corpi reali risulta sempre inferiore a quella del corpo nero, e può in base ad essa essere valutata mediante l'introduzione di una proprietà radiativa nota come *emissività*  $\varepsilon$ . Essa è definita come rapporto tra la radiazione emessa da una superficie e quella emessa dal corpo nero alla stessa temperatura. In generale l'emissività di una superficie reale dipende sia dalla lunghezza d'onda, sia dalla direzione, in quanto l'emissione di una superficie reale non è normalmente diffusa.

Il potere emissivo globale de una superficie reale è:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.25)$$

#### 1.4.4.- Fattori di vista

Come avevamo già visto nell'introduzione, uno dei problemi principali che incontravamo nella valutazione della potenza termica scambiata tra due superfici, che per comodità supporremo per il momento nere, era il fatto che non tutta l'energia emessa dalla superficie 1 incideva sulla 2 e viceversa.

Definiremo, quindi, fattore di vista,  $F_{12}$ , la frazione di energia che lascia la superficie 1 ed incide sulla superficie 2.

Si potrebbe dimostrare che la sua espressione dipende solo dalle caratteristiche geometriche delle superfici considerate.

In definitiva per 2 superfici nere il fattore di vista è definito come:

$$F_{12} = \frac{q_{1 \rightarrow 2}}{A_1 E_{b1}} \quad (1.26)$$

Esistono poi delle relazioni che legano i fattori di vista.

- Relazione di reciprocità

Si può dimostrare che:

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (1.27)$$

questa relazione è comoda perché noto un fattore di vista ci permette di calcolare l'altro.

- Regola della somma.

Data una cavità formata da N superfici si ottiene semplicemente dal primo principio che:



$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (1.28)$$

Analizzando la (1.28) si vede che esiste anche il fattore di vista  $F_{ii}$  che rappresenta la frazione di energia che lascia la superficie  $i$ esima ed incide sulla stessa.

In particolare:

Per superfici concave:

$$F_{ii} \neq 0 \quad (1.29)$$

Per superfici convesse o piane

$$F_{ii} = 0 \quad (1.30)$$

#### 1.4.5.- Scambio di calore tra due superfici nere

Consideriamo lo scambio termico tra due superfici nere arbitrarie. Lo schema è rappresentato in Figura 1.9

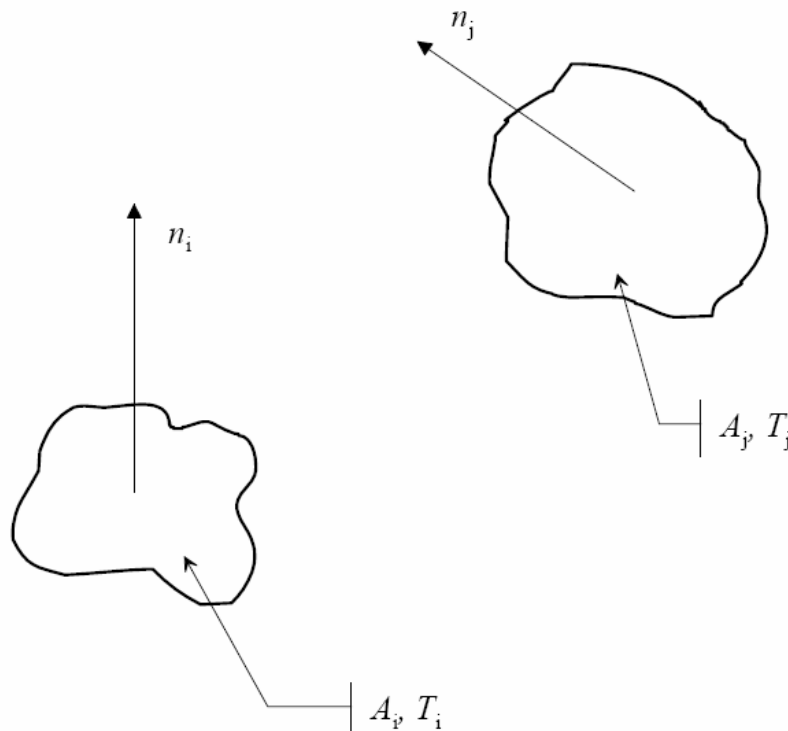


Figura 1.9: Superficie arbitrarie

La potenza termica che lascia la superficie  $i$  ed incide sulla  $j$  vale:

$$q_{i \rightarrow j} = E_{bi} A_i F_{ij} \quad (1.31)$$

La potenza termica che lascia j ed incide su i:

$$q_{j \rightarrow i} = E_{bj} A_j F_{ji} \quad (1.32)$$

La potenza neta scambiata sulla tra le due superfici sarà:

$$q_{ij} = A_i F_{ij} E_{bi} - A_j F_{ji} E_{bj} \quad (1.33),$$

che semplificando con (1.27)

$$q_{ij} = A_i F_{ij} (E_{bi} - E_{bj}) = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (1.34)$$

Estendendo il risultato appena ottenuto ad una cavità formata da N superfici si ottiene che la potenza netta scambiata dalla superficie i vale:

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (1.35)$$

## Capitolo II: Riferimenti normativi

Il presente lavoro di tesi consiste nella calibrazione e messa in funzionamento di una “Hot Box” per la misura della trasmittanza termica di finestre e porte complete.

Il disegno della macchina è stato già il tema di un lavoro di tesi precedente. Tutti gli elementi di essa, riguardo a dimensioni, accuratezza, materiali impiegati,... sono stati sviluppati in conformità con la norma UNI EN ISO 12567-1, che descrive questo metodo sperimentale in maniera più precisa, ma sempre sulla base di quello descritto nella UNI EN ISO 8990.

In questo capitolo si analizza anche la norma UNI EN 1934 perchè è stata misurata la resistenza termica di un campione in calcestruzzo alleggerito, per uso in edilizia, facendo uso di termoflussimetri. Anche se la “Hot Box” non viene disegnata esplicitamente a questo scopo, tanto l'apparechiatura come i sensori e i moduli d'acquisizione dei dati soddisfano tutti i requisiti che stabilisce questa norma, per cui non si prevedono prove di calibrazione dell'apparato.

## **2.1.- UNI EN ISO 8990: Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario**

La norma specifica i principi per la progettazione dell'apparecchiatura, le tecniche di misurazione ed i requisiti minimi che devono essere soddisfatti per la determinazione in laboratorio delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario di componenti generale per edilizia e di componenti simili per uso industriale.

Come abbiamo visto nella introduzione teorica, di solito i processi di trasmissione del calore sono una combinazione di conduzione, convezione e radiazione. I metodi descritti in questa norma misurano la quantità totale di calore trasferito da un lato all'altro del provino, per una data differenza di temperatura, indipendentemente dai modi di trasmissione (escluso il trasferimento di massa attraverso il provino durante la prova).

Facendo uso delle tecniche espiegate nella norma si può misurare la trasmittanza termica e la resistenza termica di provini verticali, come muri e orizzontali, come soffitti e pavimenti. Come requisito per l'ottenzione di una accuratezza accettabile nelle misure, bisogna che l'apparecchiatura sia abbastanza grande per studiare componenti in scala reale.

In quanto riguarda al nostro lavoro, qui solamente faremo referenza alla tecnica della *doppia camera calibrata*, sebbene la norma parla anche dei requisiti della *doppia camera con anello di guardia*.

In entrambi i metodi, il provino è posto tra una camera calda ed una fredda, le cui temperature ambiente sono note. Le misurazioni vengono eseguite in condizioni di regime stazionario dell'aria, delle temperature delle superfici e dell'energia immessa nella camera calda. Da queste misurazioni vengono calcolate le proprietà di trasmissione termica del provino. Il calore scambiato sulle superfici del provino comprende sia componenti convettive che radiative. La prima dipende dalla temperatura e dalla velocità dell'aria e la seconda dipende dalla temperatura e dall'emissione totale emisferica delle superfici del provino e delle superfici "viste" dalla superficie del provino. Gli effetti del calore trasmesso per convezione e radiazione sono conglobati nel concetto di una "temperatura ambiente" e di un coefficiente di scambio termico superficiale.

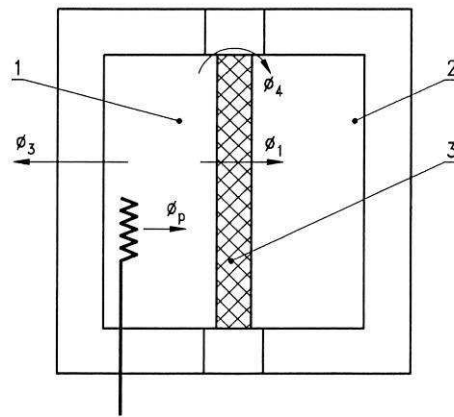


Fig 2.1 Schema della doppia camera calibrata

Nella figura possiamo vedere lo schema d'una doppia camera calibrata. Grosso modo, costa di tre parti: *camera calda* (1), *camera fredda* (3) e uno spazio tra loro due dove viene messo il *campione di prova* (2). Essa è circondata da uno spazio in cui la temperatura è controllata ma non è necessariamente alla stessa temperatura dell'aria dentro la camera di misurazione. Le dispersioni termiche attraverso le pareti della camera,  $\Phi_3$ , sono mantenute basse usando una costruzione ad alta resistenza termica. Per il calcolo della trasmittanza termica, la potenza termica totale immessa,  $\Phi_p$ , deve essere corretta per le perdite attraverso la parete,  $\Phi_3$ , e per le perdite laterali  $\Phi_4$ . L'importanza dei primi è determinata nelle prove di calibrazione, mentre le perdite laterali (vedere figura 2.2) sono proporzionali alla differenza di temperatura tra le camere ed al perimetro della zona di misurazione. Il coefficiente di proporzionalità viene chiamato trasmittanza termica lineica,  $\Psi$ .

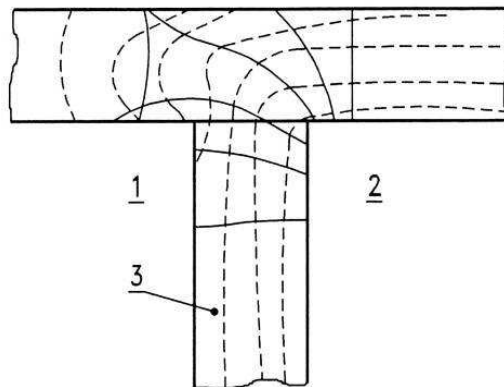


Fig 2.2 Linee di flusso nel provino e nel telaio

In ordine di mantenere queste perdite entro dei limiti accettabili lo spessore del provino viene limitato per la dimensione del area di misurazione. Se esso è troppo grande può fare diminuire  $\Phi_p$  diventando quindi il rapporto  $\Phi_3 / \Phi_p$  e  $\Phi_4 / \Phi_p$  prossimo a 1 e non essendo significativi i risultati ottenuti.

Nella norma si fa riferimento anche ad una serie di requisiti relativi alla costruzione della camera di misurazione, agli equipaggi di riscaldamento e ventilazione, ai dimensioni e proprietà termiche della camera fredda... Requisiti non oggetto di questo lavoro di tesi, in tanto l'apparechiatura è stata già disegnata e costruita. Invece, faremo attenzione nei requisiti delle misurazioni di temperatura e condizioni della prova.

Secondo la norma, i sensori per la misurazione della temperatura dell'aria e della superficie del provino, dovrebbero essere spazati uniformemente sulla superficie del provino e dislocati dalle parti opposte del lato caldo e di quello freddo. Devono essere analizzate anche le temperature della superficie dell'apparechiatura "vista" dal provino in ordine del calcolo della temperatura media radiante.

Si raccomanda la scelta dei sensori in modo da non cambiare la temperatura nel punto di misurazione.

In quanto riguarda la misurazione della temperatura dell'aria, il sistema di acquisizione deve avere un'appropriata costante di tempo. Inoltre, nella convezione naturale, i sensori di temperatura devono essere posizionati al di fuori dello strato di contorno, essendo il suo spessore, nella maggior parte dei casi, di pochi centimetri (fino a 10cm se si parla di regime turbolento). Nella convezione forzata, ci deve essere un moto turbolento pienamente sviluppato tra il provino e lo schermo ed i sensori devono essere posizionati in modo da rilevare la temperatura della massa d'aria.

Le condizioni di prova devono essere scelte considerando l'applicazione finale. Sia la temperatura media di prova che le differenze di temperatura influenzano i risultati delle prove. Temperature medie da 10°C a 20°C e una differenza  $T_{calda} - T_{fredda}$  di almeno 20°C, sono comuni nelle applicazioni per edilizia. Durante la prova, sarà necessario anche tenere conto dell'umidità del provino e la sua disomogeneità, per poter valutare le sue influenze nei risultati finali.

Le misure per il calcolo delle proprietà termiche devono essere realizzate dopo raggiungere la stazionarietà. Il tempo necessario dipende da fattori come la resistenza termica e la capacità termica del provino, coefficienti superficiali, presenza di trasporto di massa, dalla prestazione dei regolatori automatici dell'apparecchiatura...

I procedimenti di calibrazione e di prova sono descritti in dettaglio nell'altre due norme: UNI EN ISO 12567-1 e UNI EN 1934.

## **2.2.- UNI EN ISO 12567-1: Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda**

### *2.2.1.- Introduzione*

Questa norma, sempre sulla base della UNI EN ISO 8990 però, specifica un metodo per misurare la trasmittanza termica di una finestra o porta: quello della *doppia camera (calibrata ovvero con anello di guardia)*. Essa tiene conto di tutti gli effetti dei telai, dei telai scorrevoli, delle imposte, delle ante delle porte e dei montaggi. Nonostante, non include gli effetti di bordo che si verificano fuori del perimetro del campione; l'intercambio d'energia dovuto all'irraggiamento solare; gli effetti delle infiltrazioni di aria attraverso il campione ne lucernari ed elementi in risalto.

La determinazione della trasmittanza termica richiede due fasi. In primo luogo, sono effettuate misurazioni su due o più pannelli di calibrazione caratterizzati da proprietà termiche note, a partire dalle quali vengono determinati il coefficiente superficiale di scambio termico su entrambi i lati del pannello di calibrazione, la frazione convettiva (che più avanti sarà utile nella determinazione della temperatura ambiente) e la resistenza termica del pannello di supporto. Dopo si posiziona il campione di finestra o di porta nella stessa apertura e con le stesse condizioni ambientali della calibrazione viene misurata la trasmittanza termica di esso facendo però, le opportuni correzioni per il flusso termico di bordo e perdite laterali. Alla fine, i risultati vengono corretti in funzione dei coefficienti di scambio termico superficiale normalizzati.

### *2.2.2.- Requisiti dell'apparecchiatura di prova*

A questo punto, la norma fa referencia alle caratteristiche (dimensioni, materiali...) desiderate del pannello di supporto, dei campioni di prova, dei pannelli di calibrazione e dell'apparecchiatura per la misurazione delle temperature e del flusso d'aria.

Su questo lavoro, non parleremo ne del pannello di supporto ne dei campioni di prova, benché entrambi sono dati per noi e la modifica delle sue caratteristiche non è più possibile.



### Pannelli di calibrazione

I pannelli di calibrazione devono avere dimensioni simili al campione di prova (entro  $\pm 40\%$  dell'altezza e della larghezza). Essi sono richiesti per stabilire le condizioni di prova specificate, per determinare i coefficienti di scambio termico superficiale e la resistenza termica del pannello di supporto. Sono costituiti da materiali di nucleo omogeneo, ben caratterizzato realizzato a partire da un pannello isolante con conduttività termica nota ed è coperto da entrambi i lati da materiale di emissività nota.

Devono esser preparati almeno due pannelli di calibrazione che soddisfino le seguenti condizioni:

- Essere costituito da un elemento piano di materiale omogeneo e stabile con conduttività termica o resistenza termica nota. Il materiale utilizzato non deve essere soggetto ad effetti di invecchiamento.
- Caratteristiche superficiali simile a quelle del campione di prova
- I pannelli devono coprire il probabile campo di valori di densità di flusso termico del campione di prova. Si raccomanda l'uso di due pannelli di calibrazione con spessore totale differente: 20 y 60mm

### Misurazioni di temperatura

Per misurazioni di calibrazione, devono essere misurate o calcolate le temperature superficiali dal lato caldo e freddo. I sensori di temperatura ed i sistemi di registrazione devono essere accuratamente calibrati. Si raccomanda che i sensori di temperatura da utilizzare per la misurazione della temperatura superficiale siano del tipo termocoppia T (rame/costana). Essi devono essere fissate sulla superficie con adesivo o nastro adesivo, con una superficie esterna ad alta emissività ( $>0.8$ ).

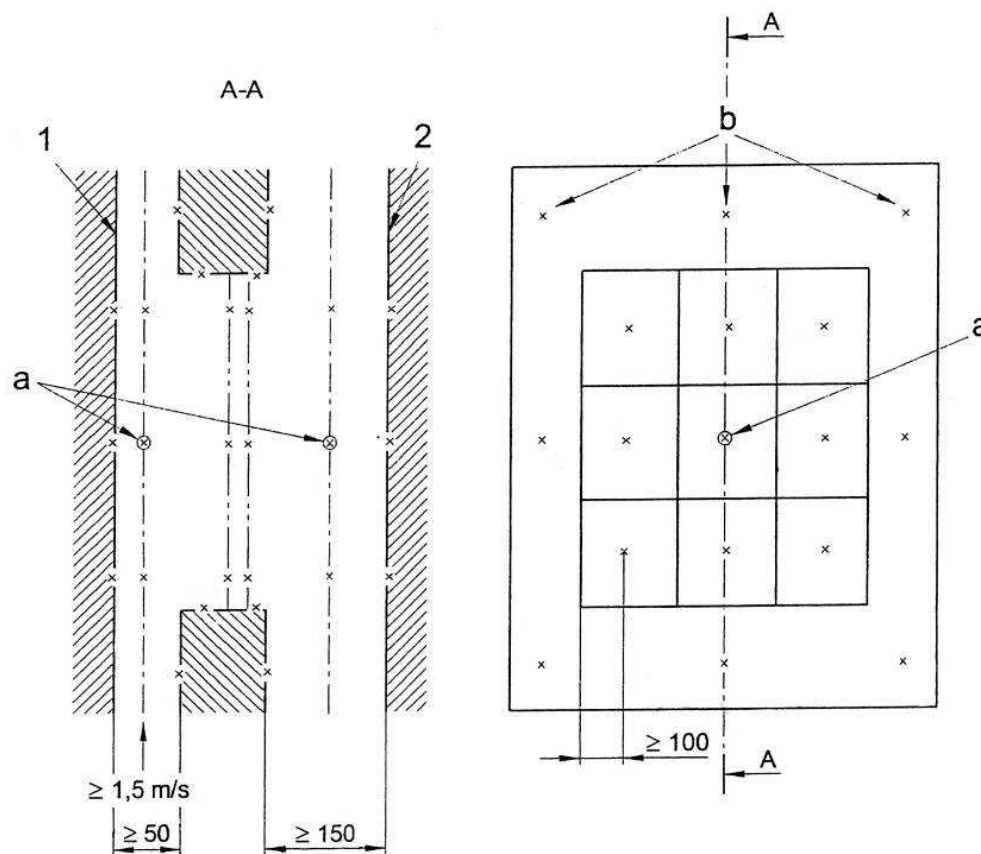
Devono essere usate almeno 9 posizioni in corrispondenza del centro di una griglia rettangolare di superfici uguali sul pannello di calibrazione e 8 posizioni sul pannello di supporto (rappresentati per una "x" in Fig 2.3). Si raccomanda non mettere i sensori a meno di 100mm dal bordo del pannello di calibrazione per evitare gli errori dovuti al flusso di bordo.

La stessa disposizione della griglia di temperatura superficiale sul pannello di calibrazione (minimo 9 punti) deve venire usata per le misure di temperatura dell'aria e del pannello di irrigidimento (1 e 2 in Fig 2.3).

Come è stato già detto nella norma 8990, le temperature dell'aria devono essere misurate da ogni lato fuori dallo strato di supporto.

### Misurazione della portata d'aria

La velocità dell'aria sul lato freddo deve essere misurata in una posizione che rappresenti la condizione di corrente indisturbata. Se viene utilizzato un piccolo ventilatore sul lato caldo, deve essere usato un sensore di velocità dell'aria per verificare che prevalga la velocità dell'aria che rappresenta la convezione naturale (minore di 0.3m/s).



*Fig 2.3 Posizionamento dei sensori di temperatura e di velocità dell'aria*

### 2.2.3.- Procedura di prova

#### Misurazioni di calibrazione

Lo scopo della calibrazione consiste nella valutazione della resistenza termica del pannello di supporto,  $R_{sur}$  (sarebbe giusto dire la resistenza termica globale di tutto ciò che non è il campione di prova), in funzione della temperatura; così come delle diverse resistenze superficiali e della frazione convettiva, in relazione al flusso termico attraverso il pannello di supporto.

Devono essere effettuate almeno sei prove di calibrazione (tre per ogni campione), in ordine di comprendere l'intero intervallo di densità di flusso termico richiesto del campione sotto studio.

Affinché i risultati ottenuti possano venire utilizzati nella normalizzazione della trasmittanza termica della finestra a studio, bisogna mantenere costante la temperatura dell'aria e le condizioni di convezione naturale dal lato caldo così come le condizioni di movimentazione dell'aria dal lato freddo, non solo durante la calibrazione ma anche nella prova su di la finestra.

Saranno realizzate prove sul pannello di calibrazione a tre differenti temperature medie dell'aria  $\theta_{c,me}$   $[\theta_{c,me} = (\theta_{c,e} + \theta_{c,i})/2]$  in passi di  $\pm 5K$ , ottenuta variando la temperatura dell'aria del lato freddo.

Grosso modo, il procedimento di calibrazione è quello che segue:

1. Flusso termico attraverso il pannello  $q_{cal}$
2. Calcolo della temperatura ambiente  $\theta_n$  in entrambi lati del campione
3. Resistenze superficiale: totale ed entrambi i lati
4. Frazione convettiva  $F_c$ .

Inoltre, per le tre prove con il pannello più spesso

5. Calcolo resistenza termica del pannello di supporto  $R_{sur}$

6. Finalmente, si rappresentano i risultati in tre grafici, pronti per essere usati nella prova sulla finestra a studio :

$$R_s - q_{cal} \quad ; \quad F_c - q_{cal} \quad ; \quad R_{sur} - \theta_{sur,me}$$

Adesso vediamo il procedimento più in dettaglio

### 1.- Flusso termico attraverso il pannello de calibrazione, $q_{cal}$

Dai sensori, conosciamo la temperatura superficiale ad ogni lato del pannello di calibrazione. Anche la resistenza termica di esso è nota con accuratezza, nonostante era uno dei requisiti per i pannelli.

Secondo la equazione (2.1), il flusso termico è:

$$q_{cal} = \frac{\Delta\theta_{s,cal}}{R_{cal}} \quad (2.1)$$

### 2.- Calcolo della temperatura ambiente $\theta_n$

Come avevamo detto prima, la trasmissione del calore avviene sia per convezione che per irraggiamento. La norma considera l'effetto globale attraverso l'introduzione di la “temperatura ambiente”  $\theta_n$ , che viene calcolata come la media pesata della temperatura media radiante,  $\theta_r$  e della temperatura media dell'aria  $\theta_c$ . Si usa il concetto *resistenza superficiale* (ponderata tra i due effetti), che è la relazione esistente fra il flusso termico attraverso il pannello e la differenza di temperatura ambiente-superficie.

$$\theta_n = \frac{h_c \theta_c + h_r \theta_r}{h_c + h_r} \quad (2.2)$$

dove  $h$  è il coefficiente superficiale di scambio termico, in  $W/(m^2K)$ .

La difficoltà ora è la valutazione, attraverso i dati dei sensori di temperatura, di tutti i termini che ci permettono di calcolare la temperatura ambiente.

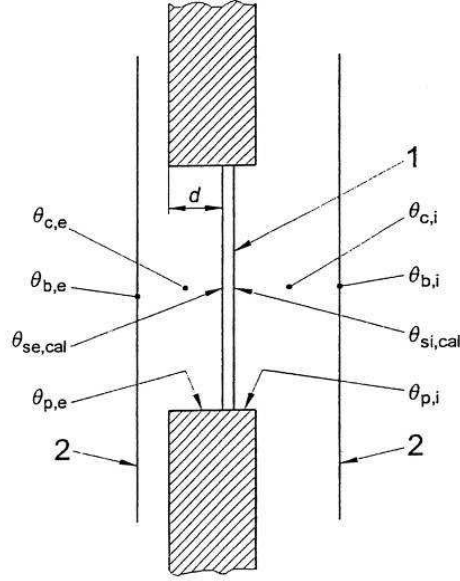


Figura 2.4 Notazioni usate per il calcolo della temperatura ambiente

Nella figura soprastante, il numero 1 indica il pannello di calibrazione o campione di prova, mentre il 2 corrisponde con il pannello di irridigimento. I pedici *e* ed *i* indicano *esterno* (generalmente lato freddo) il primo ed *interno* il secondo.

La temperatura media radiante  $\theta_r$  delle superfici “viste” dalla superficie del campione di prova (pannello di calibrazione o finestra) deve essere calcolata usando una delle seguenti equazioni, facendo riferimento alla figura 2.4 e alla tabella 2.1, dove vengono definiti i pedici che indicano il senso dello scambio termico per irraggiamento.

a) Se la profondità del pannello di supporto è  $d \leq 50mm$  :

$$\theta_r = \theta_b \quad (2.3)$$

b) Se  $|\theta_b - \theta_p| \leq 5K$  :

$$\theta_r = \frac{\alpha_{cb} \theta_b + \alpha_{cp} \theta_p}{\alpha_{cb} + \alpha_{cp}} \quad (2.4)$$

c) Negli altri casi si usa l'equazione:

$$\theta_r = \frac{\alpha_{cb} h_{cb} \theta_b + \alpha_{cp} h_{cp} \theta_p}{\alpha_{cb} h_{cb} + \alpha_{cp} h_{cp}} \quad (2.5)$$

Il coefficiente di scambio di calore per irraggiamento,  $h_r$ , in  $W/(m^2K)$ , si calcola con l'equazione (2.5):

$$h_r = \alpha_{cb} h_{cb} + \alpha_{cp} h_{cp} \quad (2.6)$$

$h_{cb}$  e  $h_{cp}$  sono i coefficienti di corpo nero di scambio di calore per irraggiamento del corpo calcolati con le equazioni (2.7) e (2.8):

$$h_{cb} = \sigma(T_{cal}^2 + T_b^2)(T_{cal} + T_b) \quad (2.7)$$

$$h_{cp} = \sigma(T_{cal}^2 + T_p^2)(T_{cal} + T_p) \quad (2.8)$$

I fattori di irraggiamento,  $\alpha_{cb}$  e  $\alpha_{cp}$ , sono calcolati trascurando le seconde riflessioni, con le equazioni (2.9) e (2.10):

$$\alpha_{cb} \approx \varepsilon_{cal} \varepsilon_b [f_{cb} + (1 - \varepsilon_p) f_{cp} f_{pb}] \quad (2.9)$$

$$\alpha_{cp} \approx \varepsilon_{cal} \varepsilon_p [f_{cp} + (1 - \varepsilon_b) f_{cb} f_{bp} + (1 - \varepsilon_p) f_{cp} f_{pp}] \quad (2.10)$$

dove  $f$  è il fattore di vista fra due superfici e  $\varepsilon$  è l'emissività emisferica.

Pedici	Verso dal....	...al...
<b>Cb</b>	pannello di calibrazione	p. irridigimento
<b>Cp</b>	pannello di calibrazione	bordo p. supporto
<b>Pb</b>	bordo p. supporto	p. irridigimento
<b>Bp</b>	p. irridigimento	bordo p. supporto
<b>Pp</b>	bordo p. supporto	bordo p. supporto

Tabella 2.1 Pedici dello scambio radiativo

La temperatura dell'aria è la media tra tutti i sensori di temperatura.

Il coefficiente convettivo di scambio termico,  $h_c$ , va calcolato con l'equazione:

$$h_c = \frac{q_{cal} - h_r \cdot |\theta_r - \theta_{cal}|}{|\theta_c - \theta_{cal}|} \quad (2.11)$$

### 3.- Calcolo delle resistenze superficiali

Se facessimo il circuito elettrico equivalente al nostro problema avremmo due resistenze in serie: quella del pannello di calibrazione,  $R_{cal}$  e la resistenza superficiale,  $R_{s,t}$  (oppure resistenza sup. lato freddo,  $R_{s,e}$  e lato caldo,  $R_{s,i}$ ). Dai dati acquisiti dei sensori, conosciamo la caduta di temperatura nel pannello di calibrazione  $\Delta\theta_{s,cal}$ . Il flusso “attraverso” la resistenza superficiale è anche noto. Allora, le resistenze superficiale, totale e di ogni lato, vengono calcolati secondo l'equazioni (2.12), (2.13) e (2.14)

$$R_{s,t} = \frac{\Delta\theta_{n,cal} - \Delta\theta_{s,cal}}{q_{cal}} \quad (2.12)$$

$$R_{s,e} = \frac{\theta_{ne,cal} - \theta_{se,cal}}{q_{cal}} \quad (2.13)$$

$$R_{s,i} = \frac{\theta_{ni,cal} - \theta_{si,cal}}{q_{cal}} \quad (2.14)$$

### 4.- Frazione convettiva , $F_c$

La frazione convettiva è un rapporto tra il coefficiente convettivo di scambio termico e quello totale, che considera anche l'irraggiamento. Dopo la calibrazione, si conosce il valore di  $F_c$  in funzione del flusso termico attraverso la finestra. Allora, la temperatura ambiente viene calcolata secondo (2.15):

$$\theta_n = F_c \theta_c + (1 - F_c) \theta_r \quad (2.15)$$

## 5.- Pannello di supporto

Finalmente, e solo per il pannello di calibrazione più spesso, viene calcolata la resistenza del pannello di supporto come la differenza di temperature fra la superficie calda e fredda, moltiplicato per l'area del pannello e diviso per l'energia scambiata attraverso il pannello ( introdotta nella camera, meno quella che segue il percorso del pannello di calibrazione e il flusso termico attraverso la zona di bordo)

$$R_{sur} = \frac{A_{sur} \Delta\theta_{s,sur}}{\Phi_{in} - \Phi_{cal} - \Phi_{edge}} \quad (2.16)$$

con  $\Phi_{edge} = L_{edge} \Psi_{edge} \Delta\theta_c$ , dove:

$L_{edge}$  è la lunghezza del perimetro tra il pannello di supporto e il provino, in metri

$\Psi_{edge}$  è la trasmittanza termica lineica della zona di bordo tra il pannello di supporto e il provino, in W/(mK)

### Misurazione sul campione di prova

Secondo la norma, la misura dei campioni di prova deve essere fatta nelle stesse condizioni delle calibrazioni, ad una temperatura media dell'aria di circa 10°C e una differenza di temperatura dell'aria,  $\Delta\theta_c$  presso venti gradi.

La norma non considera la trasmissione del calore dovuta alla ridistribuzione dell'umidità ed è per questo che essa deve essere mantenuta sufficientemente bassa da evitare la modifica della prova.

La densità del flusso termico,  $q_{sp}$ , espresso in watt per metro quadro, attraverso il campione di prova sarà calcolata come:

$$q_{sp} = \frac{\Phi_{in} - \Phi_{sur} - \Phi_{edge}}{A_{sp}} \quad (2.17)$$



dove il flusso termico attraverso il pannello di supporto viene calcolato facendo uso della sua resistenza  $R_{sur}$  (trovata nella calibrazione) e della differenza di temperatura superficiale.

La trasmittanza termica  $U_m$ , in  $W/(m^2K)$  deve essere calcolata usando l'equazione (2.18):

$$U_m = \frac{q_{sp}}{\Delta\theta_n} \quad (2.18)$$

dove  $\Delta\theta_n$  risulta la differenza fra le temperatura ambiente su ogni ato del sistema in prova.

Finalmente, la trasmittanza termica misurata del campione,  $U_m$ , deve essere corretta per l'effetto di  $q$  sulla resistenza superficiale totale,  $R_{s,t}$ , calcolata nelle prove di calibrazione, per ottenere la trasmittanza termica normalizzata,  $U_{st}$

$$U_{st} = \left[ U_m^{-1} - R_{s,t} + R_{(s,t),st} \right]^{-1} \quad (2.19)$$

Normalmente, in Europa, viene usato un valore per  $R_{(s,t),st} = 0,17 \text{ m}^2K/W$

### **2.3.- UNI EN 1934: Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro**

Visto che il principio di funzionamento dell'apparechiatura è già noto, solo faremo quà riferimento a quelli aspetti diversi rispetto alle UNI EN ISO 12567 e 8990.

Sul lato caldo del provino è montato un termoflussimetro per misurare la densità del flusso,  $q$ , che pasa attraverso il provino e attraversa una superficie di area,  $A$ , situata nel centro. Allo scopo di ottenere una misura precisa, è necessario che la densità del flusso termico sia sufficientemente uniforme su tutta questa superficie, denominata nel seguito *area di misurazione*.

La *zona de guardia* invece, è la superficie del provino che circonda la zona di misurazione. Per assicurare una densità di flusso termico uniforme nella zona di misurazione, la temperatura della zona di guardia deve essere mantenuta il più vicino possibile alla temperatura della zona di misurazione, in modo che il flusso termico di sbilanciamento  $\Phi_2$  dalla zona di misurazione a quella di guardia sia quasi zero. Inoltre, la zona di guardia deve essere abbastanza grande da assicurare che il flusso termico laterale  $\Phi_5$  sia basso, sebbene esso dipende anche dell'uso dell'isolante lungo i bordi del provino.

In generale, le misurazioni della resistenza termica secondo la UNI EN 1934 devono essere realizzate tenendo in considerazione i seguenti punti, relativi alla apparecchiatura, ai provini e alle condizioni delle prove:

- La zona di misurazione deve corrispondere ad un'area rappresentativa del provino.
- Le dimensioni dell'apparechiatura e lo spessore dei provini devono essere tali che i flussi laterali e di sbilanciamento siano entro i limiti accettabili.
- La dimensione della camera fredda deve essere la stessa della camera calda.
- Il termoflussimetro dovrebbe avere una resistenza termica tale che la resistenza termica totale dalla superficie del provino all'ambiente, dovrebbe corrispondere entro il 30% alla resistenza termica superficiale prevista per l'utilizzo reale. La sensibilità del termoflussimetro deve essere sufficiente in

modo da dare un errore minore dello 0,5% nella lettura della forza elettromotrice per la più bassa densità di flusso termico misurato.

- I sistemi di riscaldamento, di raffreddamento e di circolazione d'aria devono garantire una uniforme distribuzione della temperatura dell'aria parallelamente alla superficie del provino e accettabili gradienti di temperatura lungo la direzione del flusso d'aria.
- L'emissività delle superficie dell'apparechiatura può essere sia alta che bassa, sebbene un'alta emissività ( $\varepsilon = 0,8$  o maggiore) sia tipica dell'effettivo utilizzo dei campioni negli edifici.
- I sensori per la misurazione della temperatura dell'aria e della temperatura superficiale del provino, devono essere regolarmente spazati sulla superficie del provino e posti uno opposto all'altro sui lati caldo e freddo.
- Il numero di sensori utilizzati non deve essere minore 12 nella zona di guardia e di 9 sia nella zona di misurazione che nell'aria. Questi numeri devono essere aumentati quando esisteranno delle eterogeneità nel provino. Inoltre, i sensori per la misurazione della temperatura dell'aria devono essere schermati alle radiazioni (a meno che non sia provato che la differenza tra quelli schermati e non, sia trascurabile) e avere una costante di tempo appropriata.
- I provini devono essere tali che il trasferimento di umidità durante la prova non abbia un effetto significativo sui risultati di essa.

Quando si raggiunge lo stato stazionario, viene calcolata la resistenza termica del provino da superficie a superficie, facendo uso delle misurazioni della temperatura della superficie e la densità del flusso termico attraverso il provino, secondo la equazione (2.20):

$$R_t = (T_{si} - T_{se}) / q \quad (2.20)$$

A partire da questa grandezza misurata e dalla resistenza superficiale definita dalla EN ISO 6946, le proprietà termiche vengono calcolate secondo le equazioni seguenti:

$$R_t = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (2.21)$$

$$U = 1/R_t \quad (2.22)$$

Il tempo necessario al raggiungimento del regime stazionario dipende da alcuni fattori come la resistenza termica e la capacità termica del provino, dai coefficienti superficiali di scambio, dalla presenza di trasferimento di massa e/o redistribuzione dell'umidità all'interno del provino, dal tipo e dal funzionamento del sistema di regolazione automatica associato all'apparecchiatura.

Per assicurarsi che siano state raggiunti le condizioni di regime stazionario, si devono riportare su un grafico le misure delle temperature significative e la densità del flusso termico deve essere riportata su un grafico in funzione del tempo per scoprire qualsiasi variazione monotona.

Finalmente, dopo la realizzazione della prova, devono essere considerati i seguenti errori, allo scopo di poter garantire la accuratezza e riproducibilità dei valori ottenuti per le diverse proprietà termiche del campione:

- La differenza della temperatura media dell'aria tra il lato freddo e il caldo deve essere prossima a 20K
- Qualsiasi fluttuazione di temperatura dell'aria deve rimanere entro  $\pm 2\%$  della differenza di di temperatura aria calda/aria. Le massime derive a lungo termine non devono eccedere l'1% della differenza di temperatura attraverso il provino.
- L'errore dovuto alla posizione scorretta del sensore di temperatura deve essere ristretto al 2% della differenza di temperatura attraverso il provino.
- La temperatura superficiale deve essere uniforme in modo da ridurre l'errore dovuto allo sbilanciamento del flusso termico a valori minore del 4% di  $\Phi_1$ .

## Capitolo III: Descrizione dell'Hot Box

Il metodo della *doppia camera calibrata* è una tecnica per la misura delle proprietà termiche degli elementi impiegati in edilizia. Concretamente, l'apparato è stato disegnato allo scopo della misura della trasmittanza termica di finestre secondo la norma UNI EN ISO 12567-1, sebbene sia valida anche per misure secondo altre norme e per elementi di muratura (se sono abbastanza leggeri da non fare crollare la struttura in legno).

L'idea di base non è complicata. Il campione in prova è sistemato tra una camera calda ed una fredda, le cui temperature ambiente sono note. Il sistema d'acquisizione dei dati permette la monitorizzazione continua del processo nell'interno della camera. Appena è raggiunto il regime stazionario, facendo uso delle misure della temperatura sulla superficie del provino, nell'aria, e nelle superficie "viste" del provino insieme al flusso termico immesso nella camera (oppure il flusso termico attraverso il provino, nelle prove in conformità alla UNI EN 1934), vengono calcolati i valori delle diverse grandezze termiche del campione.

Gli elementi che formano il sistema della *doppia camera* sono, quindi:

- Un elemento che permetta il posizionamento del provino, *pannello di supporto*.
- Le due camere a temperature diverse: *camera calda e camera fredda*.
- Elementi di climatizzazione: sistema frigorifero nella camera fredda e sistema di riscaldamento nella camera calda.
- *Pannello di irradigimento*, che garantisca l'uniformità della potenza d'irraggiamento ricevuta dal campione di prova e delle condizioni di movimentazione dell'aria adatte.
- *Sensori e sistema de acquisizione dei dati*.

### 3.1 .- Pannello di supporto

Il pannello di supporto è l'elemento dell'apparecchiatura che permette il fissaggio del campione di prova. Il suo disegno deve tenere in conto tre fattori: dimensioni minime da rispettare per non disturbare le misure, dimensioni dei campioni sotto prova (versatilità) e durabilità degli elementi della macchina.



*Fig 3.1 Pannello de supporto in posizione di chiusura.*

L'Hot Box con cui abbiamo lavorato in questa tesi è atta per gli esperimenti con provini di dimensioni pari a 1,23 x 1,48 (modo finestra) oppure 1,48 x 2,18 (portafinestra), mediante la sostituzione degli elementi specifici.

Come mostra la figura 3.1, il pannello di supporto è formato da una cornice fissa che sorregge i tre pannelli che formano l'apertura. Essi sono composti da “sandwich” con legno – polistirene espanso – legno con uno strato di gomma isolante nella parte in contatto con il campione di prova.

Il pannello con forma ad “L” rimane fisso, mentre le altre due fanno un movimento di traslazione e sotto l’azione di diversi pistoni ad aria compressa (Fig 3.2) effettuano una spinta verticale ed orizzontale sul perimetro del campione in prova.



*Figura 3.2 Pistoni pneumatici di spinta degli elementi scorrevoli*

In modo da adattare l’Hot Box alle due dimensioni normalizzate per la misura della trasmittanza termica di finestre, sono stati costruiti sia il pannello con forma ad “L” che quello scorrevole laterale in due grandezze diverse, ognuna adatta per una dimensione normalizzata (1,23x1,48 o 1,48x2,18). Il disegno della macchina, con gli elementi entro una cornice fissa, rende più agevole la sostituzione di essi.



*Fig 3.3 Pannelli in “L” e scorrevole*

Il pannello superiore invece, rimane lo stesso per tutte le due misure dei provini dunque, bisognerà variare unicamente la corsa dei pistoni di spinta per metterlo in posizione.

Visto che il fissaggio del campione viene realizzato per mezzo di parti meccaniche, non risulta necessario allora l'uso di nessun tipo di schiuma indurente e la rimozione del campione si può effettuare in maniera semplice, veloce e ancora più importante, senza causare danno alcuno all'apparecchiatura.



### 3.2.- Camere di misurazione

Le dimensioni delle camere sono funzione di quelle della cornice fissa così come dello spazio necessario per sistemare entro di esse l'attrezzatura di misura e climatizzazione.

La sezione della camera parallela al campione di prova è la medesima dell'apertura della cornice fissa in ordine di non avere un pannello di supporto a due strati e la conseguente perturbazione delle misure o quanto meno l'aumento della difficoltà dei calcoli.

Per quanto riguarda la profondità, nel disegno si è scelto la minima in modo che ci entrasse l'evaporatore del sistema de refrigerazione ( poiché si tratta dell'elemento più grande) e le dimensioni permettessero ancora di ottenere un ambiente più uniforme possibile.

Sotto premesse precedenti, nella costruzione finale dell'Hot Box si ha che le camere calda e fredda hanno un volume interno per ogni camera di  $4,8 \text{ m}^3$  e dimensioni:

esterne  $2,50 \times 1,18 \times 3,20 \text{ m}$ ;

interne  $1,98 \times 0,90 \times 2,68 \text{ m}$ .



*Fig 3.4 Viste delle camere di misurazione*

La struttura delle camere è formata da pannelli in legno di 19 mm di spessore. Inoltre, le pareti vengono isolate internamente da 240 mm di polistirene espanso. Mediante questo strato d'isolante si diminuisce il flusso di calore attraverso le pareti, così da avere che quasi tutta la potenza immessa nella camera attraversi il provino.



*Fig 3.5 Dettaglio del basamento delle camere*

Come si osserva nella figura 3.5, ogni camera giace montata su una struttura in metallo dotata di ruote. È stato già visto prima che il pannello di supporto, benché alcuni dei suoi elementi siano dotati di movimenti per riuscire a serrare il provino, non si può spostare. Allora, quando si fa la misura, sono le camere a spostarsi verso la cornice fissa e chiudere così gli spazi di misurazione. Il contatto cornice fissa – camera avviene attraverso uno strato di 2 cm di spessore in gomma isolante che va incollato alle pareti delle camere e rende il serramento delle camere più effettivo, diminuendo le perdite di calore.

A causa della leggera inclinazione che presenta il pavimento nel laboratorio, la chiusura delle camere non è quella sperata nella progettazione; esistono zone nelle quali il contatto cornice fissa – gomma non è soddisfacente. Le perdite termiche in queste zone sono state confermate facendo uso di una camera infrarossa.

Si è tentato di risolvere quest'inconveniente con l'impiego di due cinghie che circondano tutto l'apparato (figura 3.6) in modo di applicare tensione nel serramento.

Un'altra possibilità che è stata presa in considerazione consiste nell'attacco di un nuovo strato di gomma isolante nella zona di contatto, stavolta sulla superficie della cornice fissa, visto che questo materiale è flessibile e permetterà quindi raggiungere l'ermeticità nell'unione in maniera più agevole.



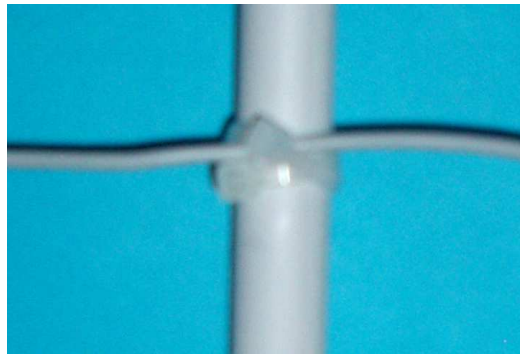
*Fig 3.6 Cinghie di serramento*

### 3.3.- Sistemi di climatizzazione

Dopo i calcoli realizzati prima del disegno dell'HotBox, erano conosciute, in maniera approssimata, le potenze necessarie per gli impianti di climatizzazione.

La situazione più sfavorevole per il sistema di riscaldamento della camera calda fu ipotizzata con temperature di 18°C nel laboratorio e -10°C nella camera fredda, ottenendo una potenza richiesta per l'impianto di 263W.

Nella costruzione finale dell'HotBox sono impiegati cavi scaldanti da 10 W/m che raggiungono una temperatura superficiale di 40°C. Grazie all'uso di essi, il problema dello spazio entro la camera non c'è più e la restrizione della profondità minima, come detto prima, corrisponde alle dimensioni dell'impianto frigorifero (è raccomandabile che entrambi le due camere abbiano la stessa dimensione).

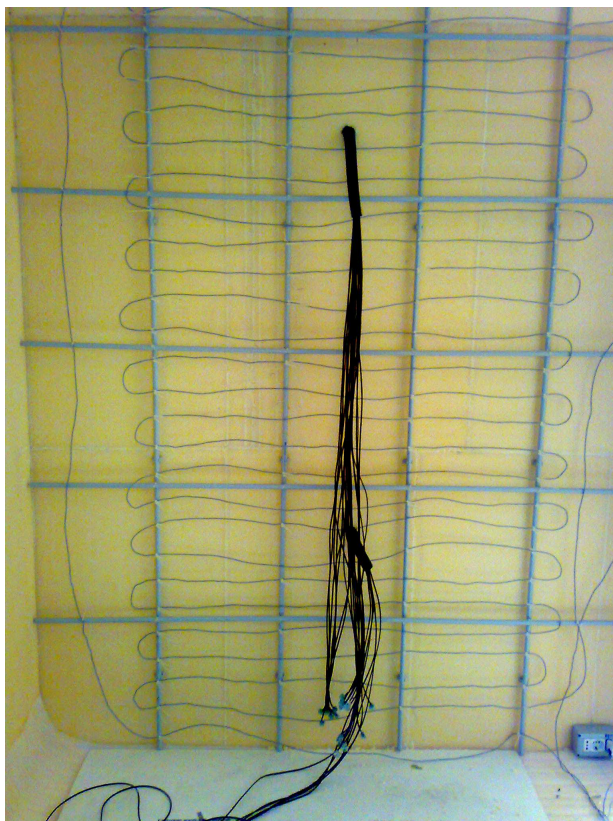


*Fig 3.7 Dettaglio del fissaggio del cavo scaldante attraverso fascette*

La lunghezza total del cavo è di 50m (500W). Essa è distribuita in maniera più uniforme possibile sulla superficie della parete. Viene fissata ad una griglia di tubi in plastica mediante fascette. Visto che il cavo raggiunge temperature di 40 C ( $\Delta T = 20$  C, rispetto l'ambiente), deve venire fissato in maniera di permettere la conseguente dilatazione. La soluzione finale risulta quella della figura 3.8

Il sistema è controllato da un regolatore PID modello ATR 121, che compara i dati di un sensore di temperatura, con la temperatura richiesta e secondo i risultati ottenuti, accende o spegne il dispositivo riscaldante.





*Fig 3.8 Filo riscaldante installato sulla parete posteriore della camera calda*

Le condizioni più esigenti per il sistema frigorifero accadrebbero quando la temperatura ambiente entro il laboratorio è alta ( $30^{\circ}\text{C}$  si è considerato per i calcoli) e la camera fredda lavora a temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ . In questo caso, la potenza di refrigerazione richiesta è di circa 370W.



*Fig 3.9 Compressore e condensatore*

Il sistema messo nell'HotBox è composto di compressore, condensatore ed evaporatore. I due primi vanno sistemati sulla parte superiore della camera fredda e si collegano all'evaporatore, posto all'interno della camera (fig 3.10). Esso funge da sistema di raffreddamento attraverso il funzionamento dei suoi ventilatori.



*Fig 3.10 Evaporatore del sistema di frigorifero.*

A seguito sono presentate le caratteristiche tecniche dell'evaporatore.

<b>Capacità</b>	kcal/h	1900
	kW	2,21
<b>Portata d'aria</b>	m <sup>3</sup> /h	870
<b>Freccia d'aria</b>	M	4,5
<b>Superficie totale</b>	m <sup>2</sup>	5,30
<b>Capacità circuito</b>	dm <sup>3</sup>	1,07
<b>Elettroventilatori</b>	n° x Φ mm	3 x 200
<b>Assorbimento motori</b>	<b>L -- A</b>	0,99
	<b>B – A</b>	1,20
<b>Sbrinamento elettrico</b>	W	1000
<b>Peso netto</b>	vers. Normale kg	10,45
	vers. ED kg	11,04

*Tabella 3.1 Scheda tecnica evaporatore con resistenza elettrica*

### 3.4.- Pannello di irridigimento

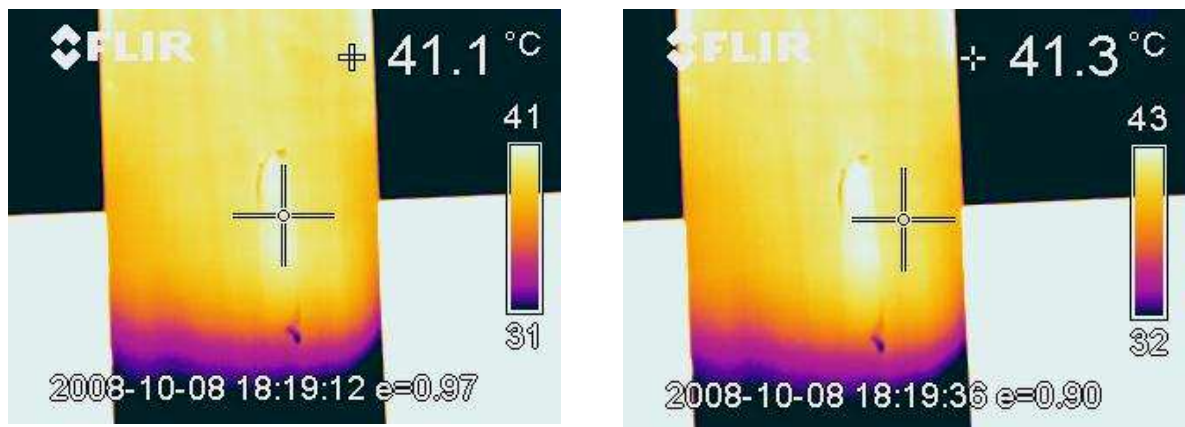
La funzione di quest'elemento è quella di garantire che il campione di prova venga sottoposto ad un irraggiamento più uniforme possibile, evitando, per esempio il contatto visivo diretto fra il provino e le fonti di calore. Secondo la norma, il pannello di irridigimento deve essere sistemato in modo che permetta il movimento convettivo dell'aria.

Prima della scelta del materiale, è stata misurata l'emissività della sua superficie allo scopo di garantire un valore alto per questa grandezza.



*Fig 3.11 Misura dell'emissività del materiale del pannello di irridigimento*

Il procedimento eseguito è mostrato nella figura 3.12. Si è sistemato una striscia di nastro con emissività nota sul legno. Essa è così sottile che segue bene le variazioni nella temperatura del legno. Introducendo il valore di emissività del nastro (0,97), viene misurata la temperatura sulla sua superficie. Poi si punta sul legno, vicino al nastro, e si modifica il valore di emissività della superficie fino a quando la temperatura indicata dalla termocamera è la stessa di quella indicata prima per il nastro. L'emissività del legno è quindi quella introdotta nella termocamera.



*Fig 3.12.- Immagine misura termocamera. Sinistra:temperatura del nastro.  
Destra:temperatura del legno*

La normativa considera pure il caso in cui il pannello di supporto fosse di un materiale a bassa emissività superficiale, essendo raggiunto uno scambio di calore simile mediante l'aumento della convezione, ma valori emissivi pressoché 0,9 sono più simili a quelli che “vedrà” la finestra nel suo uso finale in edilizia.

Una volta verificata l'emissività, il pannello in legno è stato sospeso mediante catene (fig 3.13) così da lasciare passare la portata d'aria.



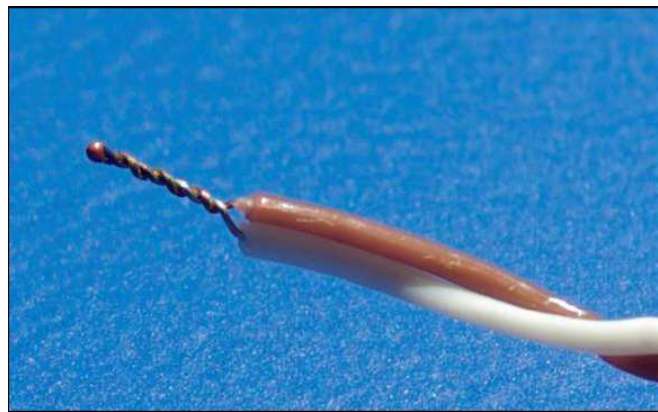
*Fig 3.13 Catena di fissaggio del pannello di irridigimento*



# Capitolo IV: Acquisizione ed elaborazione dei dati

## 4.1.- Sensori

I sensori impiegati nella misura delle temperature sia superficiali che quelle dell'aria, sono termocoppie di tipo T (rame/costana), come raccomandato nella norma UNI EN ISO 12567-1. Essi presentano una sensibilità di  $48,2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  ed un ampio rango di temperature ( $-200/400^\circ\text{C}$ ).



*Fig 4.1 Termocoppie tipo T*

Per semplicità della macchina e costo operativo, il numero di sensori è il minimo che specifica la norma, cioè:

- 9 sensori a misurare la temperatura superficiale del campione.
- 9 nel flusso d'aria.
- 9 sulla superficie del pannello di irridigimento
- 12 nel bordo del pannello di supporto
- 8 nel pannello di supporto.

Riassumendo, ci sono 47 sensori per ogni camera quindi 94 termocoppie per le misure delle temperature, più uno o due (se si usa un ventilatore nella camera calda) anemometri per la conoscenza della velocità dell'aria.

Le termocoppie per la misura delle temperature superficiali, sono fissate con nastro ad alta emissività e pasta termica così di assicurare un contatto effettivo superficie-sensore. Quelle per misurare la temperatura dell'aria invece, vengono messe attraverso dei buchi nel pannello di irridigimento in forma che rimangono tra quello ed il campione di prova (fig 4.2) in posizione giusta per valutare la temperatura della corrente indisturbata (lontano abbastanza sia del provino che del pannello).



*Fig 4.2.- Sensori per misura della temperatura nell'aria*

Le termocoppie usate sono fabbricate in lunghezza di 1 m perciò è stato necessario collegarle con altro cavo (sempre cavo rame-costana così da non alterare la misura) di lunghezza approssimata 5m. Insomma, con 6m a nostra disposizione è possibile raggiungere qualsiasi zone delle camere. Dal punto dove si vuole conoscere il valore della temperatura, il cavo passa sotto oppure sopra il pannello di irridigimento ed esce della camera attraverso uno dei due buchi che ci sono nella parete posteriore d'ogni lato.



*Fig 4.3.- Dettaglio del buco all'interno della camera*

Durante il funzionamento dell'HotBox sono state scoperte perdite di calore attraverso i buchi. Con le misure realizzate utilizzando la camera infrarossa è stato verificato che, mentre la temperatura superficiale esterna della camera era quella del laboratorio ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ), quella del condotto corrugato che attraversa il buco (con i cavi delle termocoppie nell'interno) era più vicina quella nell'interno della camera.

Visto che l'errore non poteva essere trascurabile il buco verrà sigillato con schiuma isolante indurente.

## 4.2.- Acquisizione dei dati

I diversi sensori impiegati per la misura di una determinata grandezza fisica trasformano, secondo una relazione nota, il valore di essa in un'altra grandezza la cui misura può essere realizzata in maniera più agevole.

Una termocoppia fornisce un valore di tensione proporzionale alla temperatura nel punto di misura. La tensione elettrica è una magnitudine facilmente misurabile, ma bisogna avere l'apparechiatura di misura adeguata.

Inoltre, i dati propriamente non ci servono. Questi si devono trattare, archiviare, monitorare... così da ottenere informazioni utili al nostro scopo.

Vista la complessità e la quantità dei risultati, non possiamo analizzarli se non con l'aiuto di un computer. Si rivela quindi necessario un sistema capace di collegare i sensori al computer.

Nella *camera calda* del laboratorio è impiegato il sistema *Field Point<sup>TM</sup>* della *National Instrument<sup>TM</sup>*.

Esso è composto di vari elementi che vedremo in seguito.

### 4.2.1.- Modulo Input Termocoppia a 8 canali per CompactFieldPoint

Il modulo cFP-TC-120 di National Instruments è un modulo d'input a 8 canali per operazioni di misura diretta di temperatura da termocoppie standard come J, K, T, N, R, S, E e B. È in grado di eseguire misure di temperatura o millivolt, affidabili e accurate.

Questo modulo permette la conversione della segnale elettrica che fornisce la termocoppia in informazione digitale che sarà poi inviata nel computer via Ethernet in attesa della sua utilizzazione.

Nell'HotBox del laboratorio, ci sono sei moduli in ogni camera, così da potere collegare tutte le termocoppie. Sono stati sistemati entro l'armadio d'acquisizione e controllo per mantenerli lontani della polvere e la sporcizia che possa essere presente nel laboratorio:



*Fig 4.4.- Armadio con gli elementi d'acquisizione e controllo.*

#### *4.2.2.- Blocco connettore isotermico integrato per il collegamento al modulo per termocoppie*

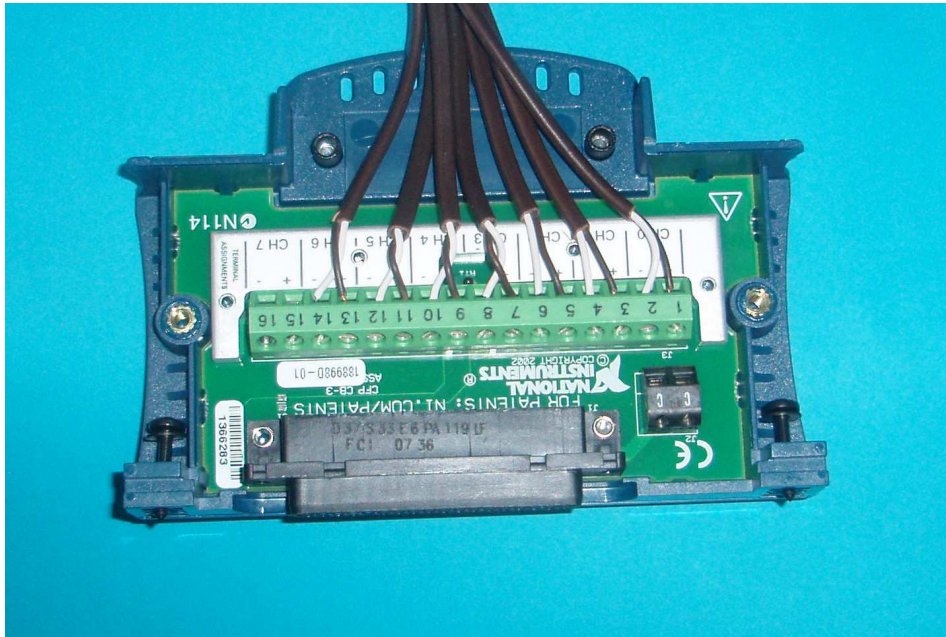
Il blocco connettore non è altro che una morsettiera dove vengono innestate le termocoppie. Attraverso di esso è possibile collegare facilmente i segnali di termocoppia al modulo d'acquisizione visto prima.

Esso include un termistore per la compensazione a giunto freddo. Inoltre, ha slot per collegare insieme i cavi e per assicurarli meglio e dei terminali con codici colorati per semplificare i collegamenti.

Durante il processo di montaggio dell'apparecchiatura si è fatto attenzione alla polarità, collegando i sensori sempre nella stessa maniera.

Il blocco connettore viene sistemato sul backplane, insieme al modulo di termocoppia, essendo il numero totale nella macchina di dodici, uno per ogni modulo di termocoppie.





*Fig 4.5.- Blocco conettore per il collegamento con i sensori*

#### *4.2.3.- Interfaccia Ethernet/Seriale per compactFieldPoint*

La interfaccia Ethernet fornisce lo spazio fisico dove sono collegati fino ad otto moduli I/O Compact FieldPoint (in questo caso moduli per termocoppia) così come i suoi blocchi connettori. Inoltre, ha la capacità di gestire il segnale d'ogni modulo e comunicarla mediante protocollo Ethernet ad un computer. Dunque, è possibile accedere ai dati I/O tramite i VI di LabVIEW o protocolli di rete standard come OPC. L'interfaccia cFP-1808 è dotata anche di una porta RS232 per la connettività seriale che permette di accedere agli I/O e di configurare moduli FieldPoint tramite una porta seriale.



*Fig 4.6.- Interfaccia Ethernet per cFP*

L'*HotBox* del laboratorio dispone di un'interfaccia cFP-1808 per ogni camera. Esse vengono sistemate dentro la scatola di controllo situata nella parte posteriore esterna delle camere (Fig 4.4). Ognuna è composta di 8 slot ( postazione per il modulo + postazione per il blocco connettore abbinato) dei quali solamente sei sono impiegati (47 sensori). Inoltre, c'è il collegamento Ethernet con il computer e il posto per la connessione d'alimentazione.

#### *4.2.4.- Potenza inserita nella camera calda*

Secondo la norma UNI EN ISO 12567-1, oltre alle temperature nelle diverse zone della camera, per il calcolo della trasmittanza termica di finestre bisogna misurare la potenza inserita nella camera calda.

Nelle prove di calibrazione, questa grandezza è necessaria nei calcoli per trovare la resistenza termica del pannello di supporto. Anche nelle prove sulla finestra bisogna conoscere il valore del flusso immesso, insieme ai valori ottenuti nella calibrazione, per il calcolo della trasmittanza termica.

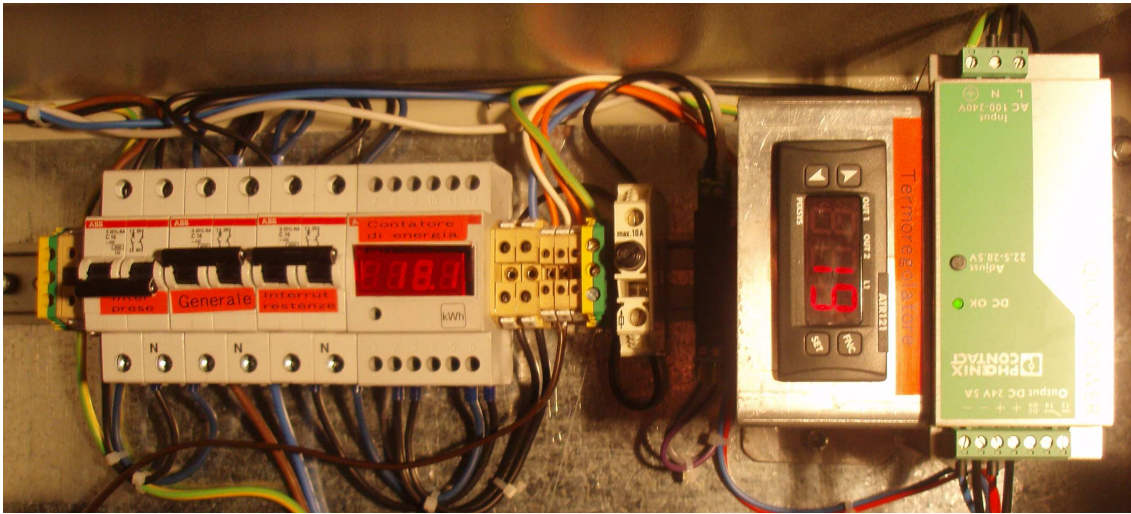
A questo punto, nel disegno dell'*HotBox*, si è scelto l'impiego di un contatore d'energia che misura il consumo elettrico del sistema di riscaldamento della camera calda. La potenza totale media immessa sarà il valore del contatore, diviso del tempo di durata della prova.

Occorre fare attenzione ad un paio di concetti al tempo di realizzazione delle prove:

- Dato che lavoriamo su un sistema con una determinata inerzia termica, solamente dopo che si raggiungerà lo stato stazionario devono essere fatti i calcoli con i valori dati dai diversi sensori. In quanto riguarda alla potenza inserita, bisognerà conoscere il valore che marca il contatore sia all'inizio che alla fine della presa dei dati e il tempo trascorso. Così si avrà conoscenza della potenza media inserita nel periodo stazionario.
- Se un ventilatore sarà introdotto entro la camera per migliorare l'omogeneità delle temperature, il valore della potenza consumata da esso deve essere aggiunto a quella del filo scaldante.

Prima ancora della realizzazione delle prove, sembra che la misura della potenza immessa possa essere fonte d'errore poiché non abbiamo un mezzo di registrare i valori

d'energia immessa in funzione del tempo. Adesso, l'unica soluzione consiste in monitorare manualmente questa grandezza.



*Fig 4.7.- Contatore d'energia, regolatore PID e trasformatore di tensione*

Nel futuro, se si vuole migliorare l'accuratezza delle prove, il contatore d'energia dovrebbe essere collegato a qualche sistema d'acquisizione di dati in maniera da registrare i valori del flusso termico inserito col tempo, e usare per i calcoli finale solamente il suo valore medio durante la fase stazionaria.



### 4.3.- Elaborazione dei dati

Come visto prima, il sensore fornisce un segnale, gli elementi d'acquisizione lo trasformano e sono capaci di comunicarlo ad un'applicazione informatica presente nel computer di controllo, attraverso un protocollo di comunicazioni noto.

Nell'HotBox del laboratorio, viene impiegato il software *Measurement & Automation Explorer della NI*. Questo software, attraverso una rete *Ethernet* acquisisce i dati dai moduli d'acquisizione e li mostra all'utente (fig 4.8) oppure è capace d'interagire con un altro software compatibile.

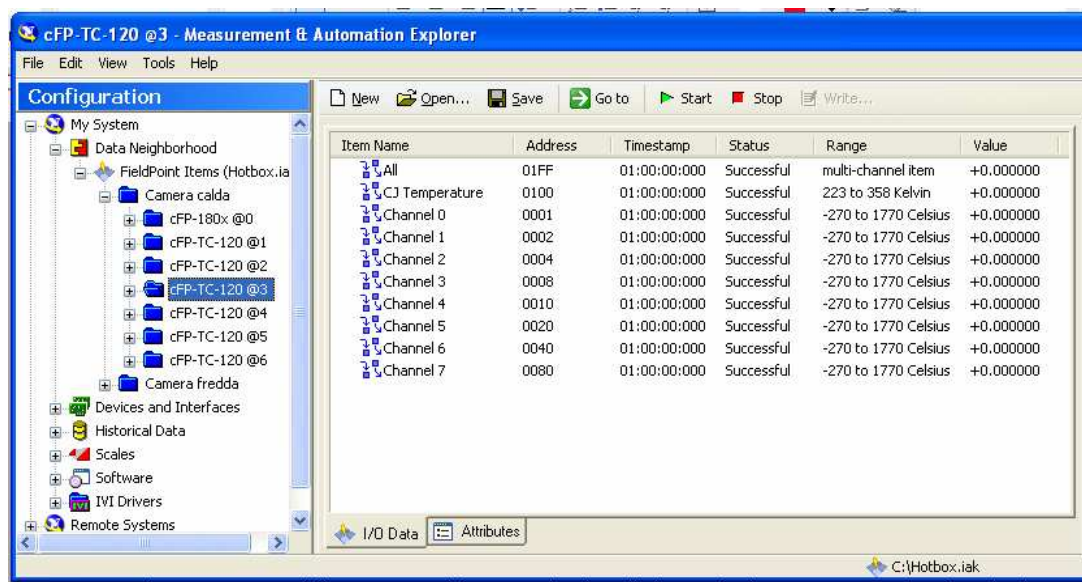


Fig 4.8.- Interfaccia grafica del Field Point Explorer

Attraverso *Measurement & Automation Explorer* è possibile modificare diversi parametri come gli intervalli temporali d'acquisizione oppure le unità di misura con le quali si vogliono visualizzare le grandezze rilevate dai singoli canali dei moduli d'acquisizione. Non permette invece il trattamento, rielaborazione né salvataggio dei dati. Bisogna allora utilizzare un altro software, che interagisca con *Field Point*, e faccia queste operazioni: *LabVIEW* de NI.

#### 4.3.1.- LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) è un ambiente di sviluppo per applicazioni orientate sia all'acquisizione di dati e alla gestione di strumentazione elettronica che all'analisi ed elaborazione dei segnali.

Esso fornisce un ambiente di programmazione di tipo grafico ad oggetti denominato "G language", il quale consente di realizzare programmi mediante l'uso d'icona invece di righe di testo.

Nonostante tutte queste semplificazioni, LabVIEW conserva comunque molte similitudini con gli ambienti di programmazione tradizionali: presenta tutti i tipi di dati e gli operatori predefiniti d'uso comune, permette di generare nuovi tipi di dati combinando tra loro i tipi di dati elementari e di controllare l'esecuzione dei programmi ricorrendo a strutture di controllo di flusso come ad esempio cicli e costrutti per l'esecuzione condizionale di codice.

Mette inoltre a disposizione del programmatore una serie di librerie di funzioni che possono essere richiamate ed utilizzate all'interno dei programmi: le librerie comprendono funzioni d'uso comune (funzioni aritmetiche e statistiche, funzioni per la manipolazione di stringhe, ...) ed inoltre funzioni specializzate per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali, il controllo di strumentazione numerica via interfaccia IEEE-488 o VXI, la trasmissione di dati mediante l'uso di porte seriali oppure mediante il protocollo di comunicazione TCP/IP. E' possibile inoltre definire nuove funzioni ed arricchire così le librerie di LabVIEW.

Infine il programma consente di fare il debug delle applicazioni create in linguaggio G attraverso opportuni modi d'esecuzione dei programmi, come ad esempio il modo "highlight execution" o "single step" e per mezzo d'oggetti che presentano in run-time la modifica di variabili di programma.

LabVIEW costituisce uno dei software più impiegato e diffuso nell'ambito dell'acquisizione dei dati e nel loro controllo nei processi industriali, nonché nel campo della ricerca scientifica. Come argomenti per il suo successo si può dire che:

- E di facile apprendimento, poiché presenta un modo di programmazione a blocchi, di tipo visuale ed intuitiva.

- Permette di dare al codice una struttura modulare che consente di suddividere programmi complessi in sottoprogrammi più semplici che possono essere riutilizzati.
- Consente di raccogliere i VI (programmi di LabVIEW) in librerie, ovvero in un insieme di sub-VI utilizzabili da altri VI e velocemente inseribili nel codice sorgente dal programmatore.
- Fornisce un considerevole insieme di librerie per lo sviluppo di applicativi, tra le quali si trovano funzioni di tipo matematico e statistico, controllo di dispositivi per mezzo di alcuni tipi di interfaccia, comunicazione tra calcolatori, ecc...

I programmi che si possono realizzare utilizzando il linguaggio grafico LabVIEW sono chiamati *Virtual Instrument (VI)*, dove il termine “strumenti” è dovuto al fatto che durante l’esecuzione, i programmi sviluppati presentano agli utilizzatori un’interfaccia analoga a quella di uno strumento di misura, mentre il termine “virtuali” è dovuto al fatto che l’interazione avviene con un programma in esecuzione e non con un dispositivo fisico dedicato.

L’utente può modificare il valore di alcune grandezze agendo su opportune manopole o interruttori visualizzati dal programma e può osservare il risultato delle elaborazioni condotte internamente al VI su display grafici molto simili a quelli che si trovano sulla strumentazione numerica.

Un VI è composto da tre parti fondamentali:

- Pannello frontale (Front Panel)
- Diagramma a blocchi funzionale (Block diagram).
- Icona/connettore (Icon/connector)

Il ***Pannello frontale*** è la finestra che rappresenta l’interfaccia tra il programma e l’utente. Nel pannello frontale trovano posto tutti i **controllori** e gli **indicatori** dello strumento virtuale. Per *controllore* si intende una variabile di ingresso che può essere modificata agendo sul pannello frontale, per *indicatore* si intende una variabile di uscita il cui valore può essere modificato dal programma e non dall’utente.

È possibile interagire con un Front Panel mediante tastiera o mouse, introducendo valori numerici o stringhe di caratteri, modificando lo stato di elementi grafici, come ad esempio manopole, bottoni e così via.

La figura a seguito mostra un esempio di pannello frontale:

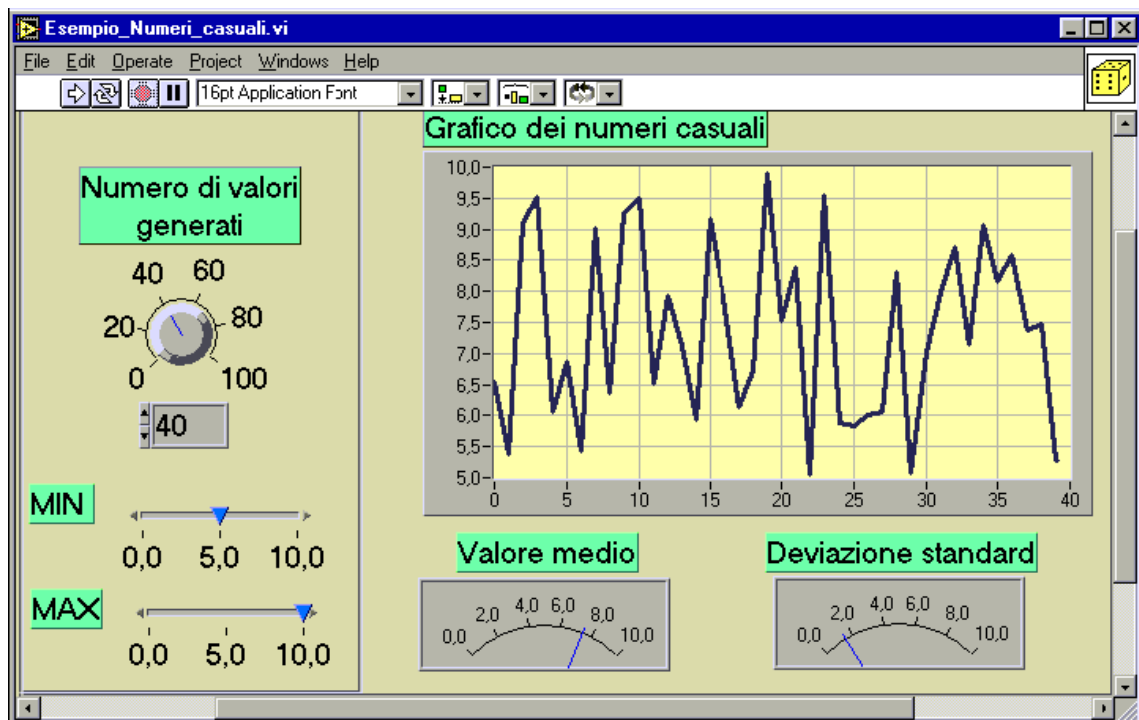


Fig 4.9 Pannello Frontale di un VI

Nella parte sinistra della figura sono situati i controllori, mentre gli indicatori stanno nella destra.

Il **Diagramma a blocchi** contiene il codice sorgente, nella forma grafica, di un VI ed è costituito da *terminali*, *nodi*, *strutture* e *fili*.

- *Terminali*

I terminali rappresentano il tipo di data del controllore o indicatore. Essi possono essere configurati nel pannello di controllo in maniera da essere visti nel diagramma a blocchi sia come icone che come terminale dei tipi di data (fig 4.10 a/b).

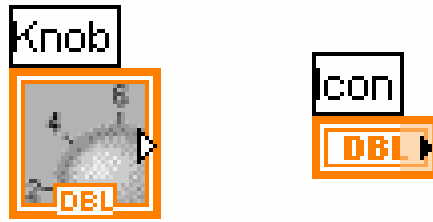


Fig 4.10 Esempio viste icona e terminale

I terminali sono posti in entrata e in uscita e permettono l'intercambio d'informazione fra il pannello frontale e il diagramma a blocchi. I dati introdotti nei controlli del *Front Panel* entrano nel *Block Diagram* tramite i terminali di controllo. Dopo che essi sono elaborati e modificati all'insieme del diagramma a blocchi, fluiscono verso i terminali indicatori, dove loro aggiornano gli indicatori del pannello frontale.

- *Nodi*

Un nodo è un elemento del diagramma a blocchi con ingressi e/o risultati e intraprende una determinata azione quando si svolge il VI. Sono l'equivalente delle istruzioni, operatori, funzioni e subroutine nei linguaggi di programmazione tradizionali.

- *Fili*

I fili uniscono i nodi e permettono lo scambio d'informazioni tra loro. Ogni filo ha un'unica origine dei dati, ma può venire collegato a parecchi VIs ovvero funzioni di lettura dei dati. I fili hanno diversi spessori e colore secondo i tipi di dati che trasmettono. Ad esempio, i dati logici vanno sempre in verde, mentre un filo blu rappresenta un intero. Un filo rotto (senza connessione) si mostra come una riga discontinua in nero con una X rossa nel mezzo e può darsi quando si tenta di collegare due nodi con formati di dati diversi.

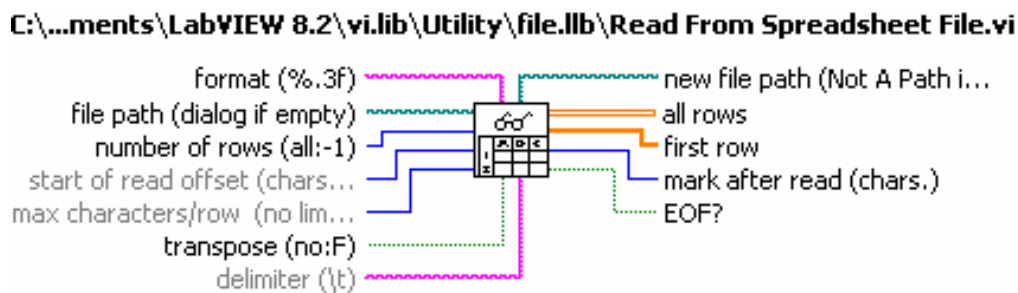
- *Strutture*

Le strutture sono rappresentazioni grafiche dei cicli o delle istruzioni condizionali nei linguaggi tradizionali.

La coppia **Icona / Connettore** è il terzo elemento fondamentale di un programma LabVIEW.

L'icona è un simbolo grafico di piccole dimensioni che rappresenta simbolicamente il VI stesso e che permette di trasformare il programma in un oggetto (nodo) in maniera tale che può essere inserito come un subVI nel pannello frontale di un altro VI.

Il connettore stabilisce la corrispondenza tra aree dell'icona e controllori / indicatori del pannello frontale.



*Fig 4.11 Vista della Icona con le connessioni di un VI*

Il lavoro realizzato in questa tesi potrebbe essere grosso modo diviso in due parti:

- Aspetti pratici: sistemazione delle termocoppie e del sistema di riscaldamento entro l'*HotBox*, fabbricazione dei provini di calibrazione, misura dell'emissività dei pannelli di irridigimento...
- Elaborazione ed interpretazione dei risultati: sviluppo di diversi programmi in LabVIEW per l'acquisizione dei valori delle termocoppie ed i calcoli in tempo reale; analisi dell'accuratezza delle prove e ricerca dei valori delle proprietà termiche per i campioni.

Di seguito sarà spiegato più in dettaglio il funzionamento dei programmi a cui si fa riferimento nel paragrafo precedente. In modo generale, essi raccolgono i dati dei sensori, lavorano con questi dati e finalmente mostrano i risultati e salvano l'informazione utile per l'analisi posteriore.

#### 4.3.2.- Programma acquisizione temperature Norma UNI EN 1934

Questa applicazione permette la monitorizzazione dell'andamento della prova in tempo reale.

Sul pannello frontale (fig 4.12) l'utente può visualizzare l'evoluzione temporale delle diverse temperature medie sia nell'aria che nella zona di misurazione sulla superficie del campione di prova, per entrambi le camere.

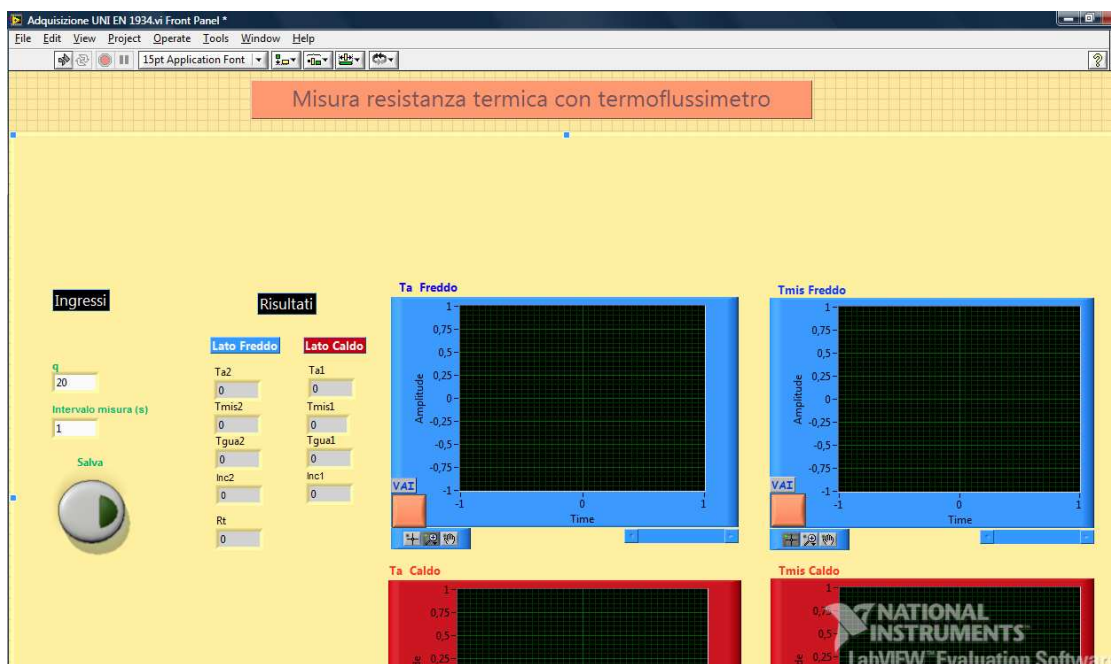


Fig 4.12.- Pannello Frontale di “Acquisizione UNI 1934”

Basta premere il pulsante “VAI” per vedere il grafico scelto a schermo completo. Per ritornare alla vista principale, premere “INDIETRO”.

Sono riportati anche i valori istantanei delle temperature medie in tutte le tre zone: aria, misurazione, guardia così come i valori della differenza di temperatura media nell'aria tra due periodi di misurazioni successivi, in ordine di avere una sorta d'indicatore (sempre sotto supervisione dell'utente) della stazionarietà del processo.

In questo programma è possibile scegliere l'intervallo di misura e salvare i dati in un archivio .txt attivando la scelta “salva” nel pannello di controllo, come mostra 4.13.

Posteriormente, questi dati possono essere analizzati più in profondità con un altro software diverso da LabVIEW.

Fig 4.13.- Dettaglio del Pannello Frontale “Acquisizione UNI 1934”

L’obiettivo della prova è trovare il valore della resistenza termica (esclusi i termini della resistenza superficiale) del campione sotto studio. Per il calcolo di questa grandezza, ci serve il valore misurato del flusso termico attraverso il campione. Esso deve essere introdotto manualmente, dato che il sistema d’acquisizione di dati collegato al termoflussimetro (Babuc), non è compatibile con LabVIEW. Un possibile indirizzo nel miglioramento delle prove quindi, sarebbe la realizzazione delle misure del flusso, usando hardware compatibile con LabVIEW.

Di seguito vengono spiegati qualche aspetto del diagramma a blocchi del programma.

LabVIEW acquisisce i dati dai sensori di temperatura attraverso i nodi I/O FieldPoint (fig 4.14) disponibile entro LabVIEW, e calcola la temperatura media in ogni zona d’interesse, per tutte le due camere.



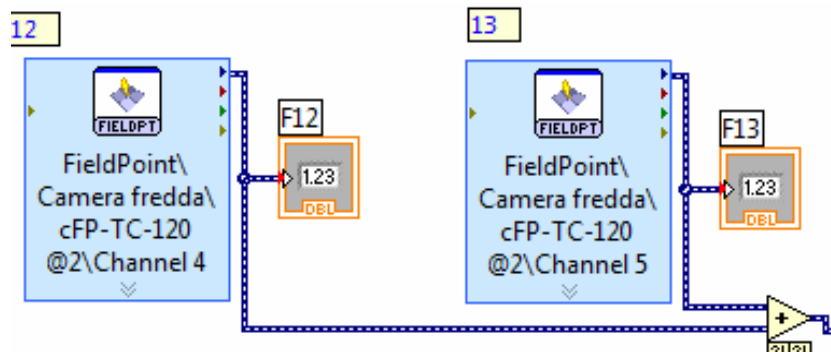


Fig 4.14.- Modulo per l'importazione dei dati del FieldPoint-LabVIEW

La resistenza del campione viene calcolata come indica la norma. Come si vede nella 4.15, la struttura che è stata impiegata permette di fare operazioni al suo interno utilizzando le variabili d'ingresso (parte sinistra) per ottenere dopo i risultati, che diventano allora variabili del programma e possono diventare uscite del nodo (parte destra).

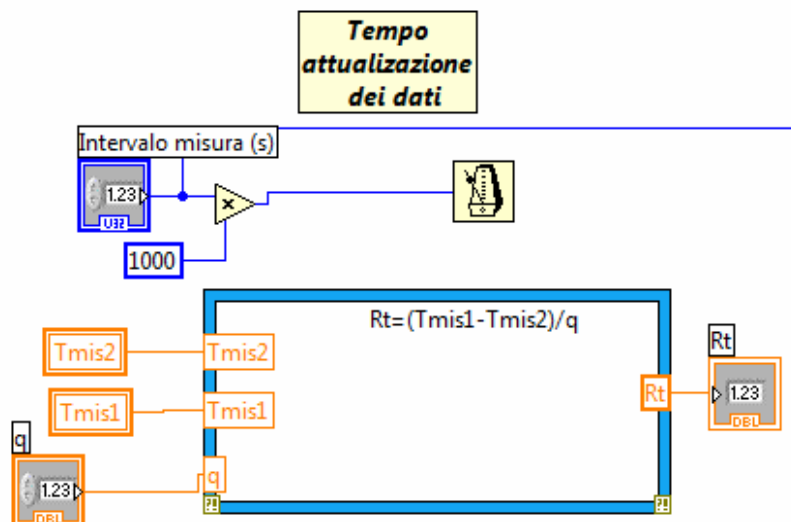


Fig 4.15.- Calcolo Resistenza ed Intervallo di misura

Viene impiegato un ritardo entro la struttura ripetitiva generale. Così, tutti gli operatori che rimangono all'interno del bucle solamente si eseguono una volta ogni ciclo.

La registrazione dei dati si fa come mostra la figura seguente, solamente quando l'opzione corrispondente nel pannello di controllo è attiva:



i valori dati dai sensori in diverse rappresentazioni: grafica temporale, valore istantaneo per ogni posizione....



*Fig 4.18.- Vista della finestra d'inizio*

Il codice grafico che permette e controlla il cambio di finestra è mostrato di seguito. sono impiegati un nodo “Tab Control”, ed un “Search 1D array”.

Il primo ha come input un numero e mostra la finestra coincidente con quel numero.

Il nodo “Search 1D array” fornisce la posizione di un elemento determinato (input) entro una matrice. Se l’elemento non si trova nella matrice, il valore del “output” è quello preventivamente stabilito.

Nel programma di calibrazione abbiamo una matrice logica. All’inizio, tutti gli elementi di essa sono “False”, allora l’uscita del “Search 1D array” è “0”, e si mostra la finestra principale.

Quando l’utente vuole vedere un’altra finestra, preme il pulsante giusto, e l’elemento della matrice corrispondente diventa allora “vero”. La uscita del “Search...” è la posizione dell’elemento e quindi il “TabControl” mostra la finestra scelta, fino a che viene premuto il pulsante “inizio”, che fa l’elemento della matrice di nuovo “falso”.

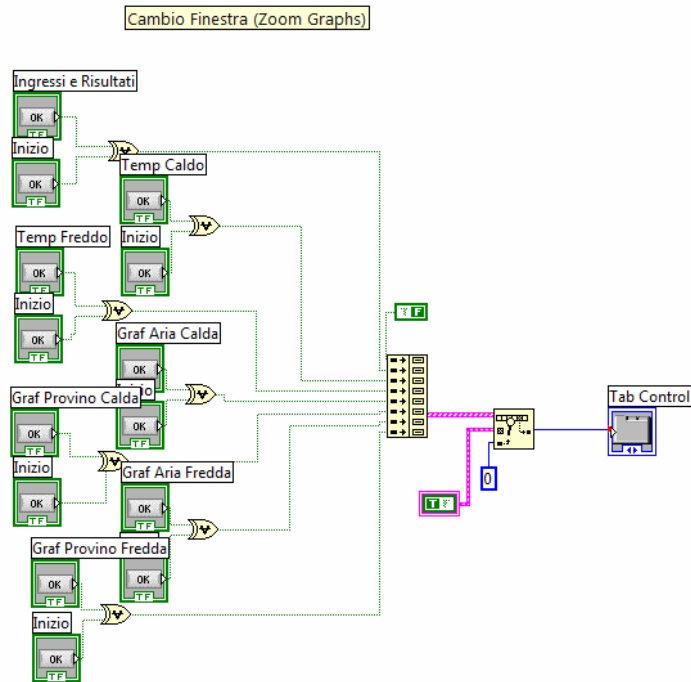


Fig 4.19.- Controllo del cambio di finestra

Il codice di cambio di finestra non si trova entro il bucle principale, ma in un altro bucle ripetitivo, in modo da non essere affettato dal ritardo imposto per l'acquisizione e potere così realizzarsi il cambio di finestra in maniera istantanea.

Nella finestra "Ingressi e Risultati" vengono introdotti i diversi valori delle variabili dell'esperimento, come sono: fattori geometrici della camera, emissività dei diversi membri nella prova, resistenza del pannello di calibrazione...

Su di essa si possono visualizzare anche i risultati (istantanei) delle diverse resistenze e dei fattori convettivi.

Oltre ad introdurre i valori delle variabili d'ingresso e ottenere i risultati, su questa finestra l'utente del programma sceglie l'intervallo di misura e se si vuole salvare i dati (valori di tutti i sensori e risultati) in un archivio .txt per il suo posteriore uso con un altro software d'analisi. Il codice per il salvataggio dei dati è simile a quello mostrato nelle figure 4.16, essendo la struttura del archivio .txt quella della figura 4.17

### Ingressi

**Resistenza Pannello de Calibrazione (m2K/W)**

0

**Salva Dati?**

**Emissività**

Emissività-cal

0

Emissività-b

0

Emissività-p

0

**Intervallo de misura (s)**

1

**Fattore di vista, Lato Caldo**

Cal-Irrid

Cal-BordoSupp

BordoSupp-Irrid

BordoSupp-BordoSupp

Irrid-BordoSupp

0

0

0

0

0

**Fattore di vista, Lato Freddo**

Cal-Irrid

Cal-BordoSupp

BordoSupp-Irrid

BordoSupp-BordoSupp

Irrid-BordoSupp

0

0

0

0

0

**Energia Inserita nella Camera Calda (W)**

0

**Trasmitanza termica lineica zona di bordo W/(mK)**

0

### Risultati

**Resistenza superficiale totale**

0

**Resistenze superficiale parziale**

Freddo

0

Caldo

0

**Resistenza del pannello di supporto**

Rsur

0

**Fattori convettivi**

Freddo

0

Caldo

0

**Inizio**

Fig 4.20.- Finestra “Ingressi e Risultati”

Premendo la tastiera “Inizio”, il programma ritorna alla finestra principale.

Nella seguente figura vengono rappresentati in maniera schematica il pannello di supporto (arancione), il bordo di esso (nero) ed il campione di prova (in centro). Ogni indicatore numerico rappresenta una termocoppia e il valore indicato, la temperatura istantanea in quel punto. Ci sono due finestre come questa, una per ogni camera.

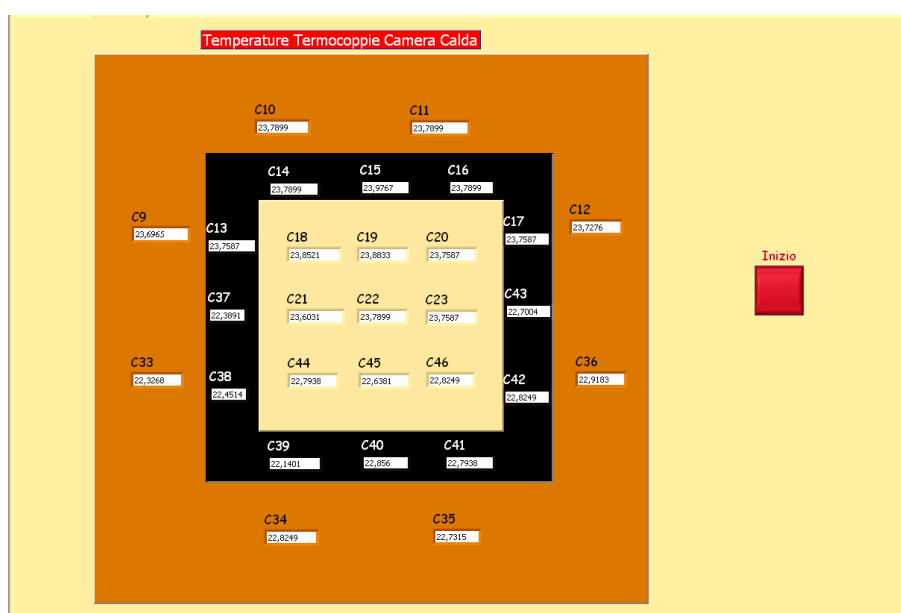


Fig 4.21.- Rappresentazione spaziale delle misure delle termocoppie

L'ultimo modello di finestra che si trova nel programma è quella della figura 4.22. Mostra l'evoluzione temporale del valore di una temperatura media e permette così stabilire il momento in cui è raggiunto il regime stazionario. Ci sono quattro finestre come questa nel programma. Esse mostrano la temperatura dell'aria e la temperatura nella zona di misurazione (pannello di calibrazione ) sia per la camera calda che per la fredda.



*Fig 4.22.- Evoluzione temporale della temperatura media nella zona di misurazione*

## **Capitolo V: Misura della trasmittanza termica secondo UNI EN 1934**

Le caratteristiche dimensionali e termiche della *camera calda* disponibili nel laboratorio sono adatte pure per la realizzazione di prove secondo la norma UNI EN 1934. Così si è misurata la resistenza termica di un massetto alleggerito che ha dimensioni (*mm*)  $1230 \times 1480 \times 10$ ; esso è costituito da una miscela di fibre polimeriche di 522 kg, 150 kg di cemento 325 e 100 litri di acqua, in dosi indicata per metro cubo.

Secondo questa norma, l'apparecchiatura necessaria per eseguire le prove così come l'elaborazione dei dati risulta più semplice. Invece di avere bisogno di 47 termocoppie in ogni camera, bastano una trentina sistemate sulla superficie del campione (nove nella zona di misurazione e dodici nella zona di guardia) e sull'aria. La resistenza viene calcolata a partire dalle temperature superficiali ed il flusso termico attraverso il campione, misurato con un termoflussimetro.

## 5.1.- Strumentazione di misura

### 5.1.1.- Descrizione della strumentazione

La misura delle temperature viene effettuata mediante termocoppie tipo T, come è stato già visto nel Capitolo IV: *Adquisizione ed elaborazione dei dati*. Tutte esse sono state collegate al modulo di acquisizione *CompactFieldPoint* della *National Instruments* che trasmette i dati al computer per la sua elaborazione con il programma di LabVIEW sviluppato a tale scopo.

Inoltre, la norma UNI EN 1934 impone l'uso di un termoflussimetro. Un termoflussimetro è un trasduttore che fornisce un segnale elettrico proporzionale alla densità del flusso termico che lo attraversa. Sono costituiti da piastre termicamente resistenti, con sensori di temperatura posizionati in modo che il segnale che forniscono risulti direttamente correlato alla densità di flusso che li attraversa. La variazione di temperatura all'interno del sensore viene misurata per mezzo di termocoppie giuntate in serie che prendono il nome di termopile.

Il termoflussimetro utilizzato è il mod. BSR240 della LSI con le seguenti caratteristiche:

- Dimensioni: Circolare:  $\Phi = 30$  mm,  $s = 4$  mm
- Elemento sensibile: termopila;
- Campo di funzionamento:  $-125 \div +1500$  W/m<sup>2</sup>;
- Temperatura di esercizio:  $-40 \div +70$  °C;
- Tolleranza: 3 % VL  $\pm 1$  W/m<sup>2</sup>,
- Non linearità:  $< 1,5$  %



Fig 5.1.- Termoflussimetro BSR 240



Esso viene anche collegato a ad un sistema di acquisizione di dati, capace di poter immagazzinare i dati e di eseguire elaborazioni sui valori acquisiti. I dati così acquisiti possono essere riversati su computer ed elaborati.

Si è impiegato il sistema multicanale BABUC della LSI (fig. 5.2)



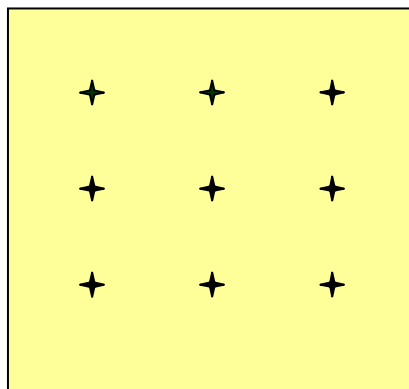
*Fig 5.2.- Acquisitore BABUC*

Nella prova effettuata sul campione, l'intervallo d'acquisizione del valore del flusso termico è stato di trenta secondi.

### *5.1.2.- Messa in opera della strumentazione*

#### *a) Misura della temperatura dell'aria*

In conformità con la norma, si sono impiegati nove termocoppie per la misura della temperatura dell'aria. I sensori sono stati sistemati come si mostra nella figura. Sono introdotti attraverso dei buchi nel pannello di irridigimento. La sua posizione è tale di non essere influenzati dagli effetti di bordo e misurare la temperatura nel flusso indisturbato. La distribuzione nel piano parallelo al campione è regolare, come mostrato nella figura:



*Fig 5.3.- Posizionamento dei sensori per la misura della temperatura nell'aria*

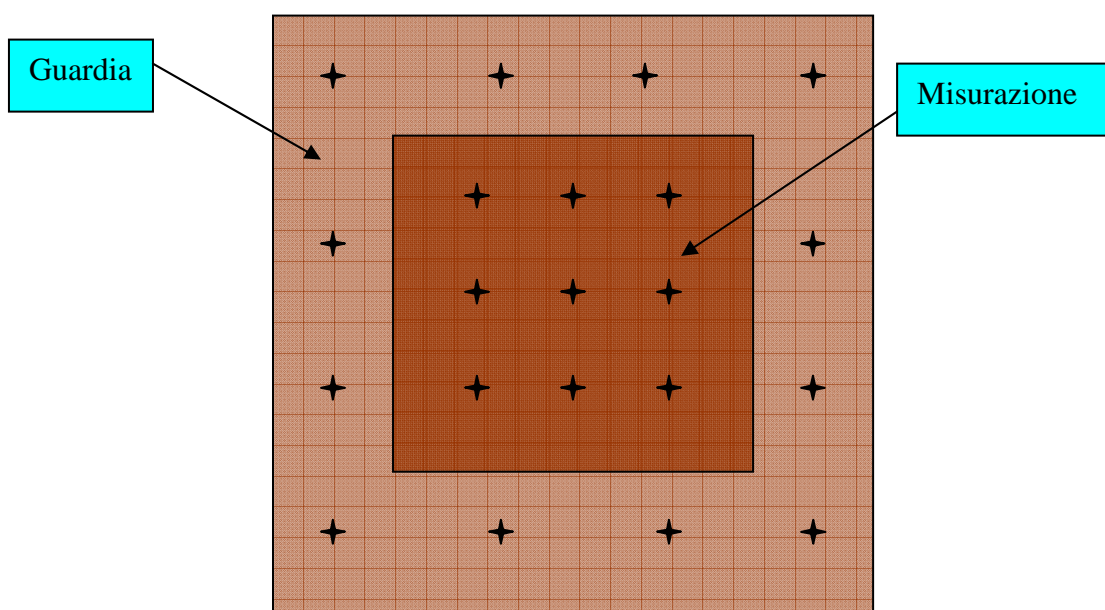


*Fig 5.4.- Termocoppia per misurare la temperatura dell'aria*

*b) Misura delle temperature superficiali*

Si sono individuati due zone nella superficie del campione: zona di misurazione e zona di guardia. Sulla zona di misurazione sono state sistemate nove termocoppie, con disposizione simile a quelli dell'aria, formando una griglia di 3x3.

La misura della temperatura nella zona di guardia serve per controllare il flusso di sbilanciamento nel campione e verificare che è abbastanza piccolo in modo di non disturbare i risultati. La disposizione superficiale schematizzata è la seguente:



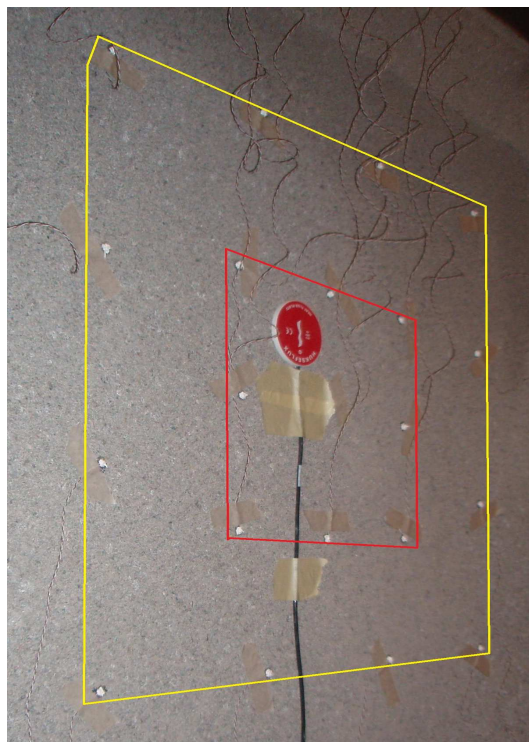
*Fig 5.4.- Posizionamento dei sensori di temperatura sulla superficie*

Le termocoppie sono state poste in opera (figura 5.5) mediante una pasta termica conduttrice, avvolgendole con questa per non renderle troppo sensibili alle eventuali fluttuazioni della temperatura dell'aria.



*Fig 5.5.- Dettaglio del fissaggio della termocoppia con pasta indurente*

Nella figura 5.6 si può vedere come vengono sistemate le termocoppie. Il quadro giallo indica i sensori della zona di guardia, mentre il rosso quelli della di misurazione.

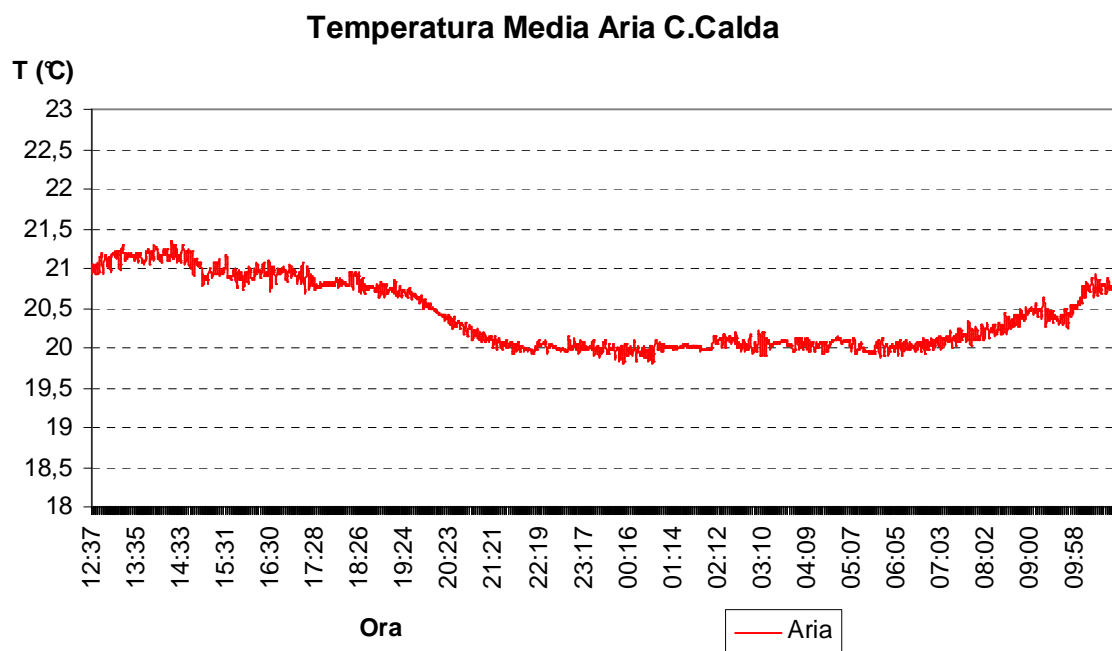


*Fig 5.6.- Zone di guardia e misurazione nel lato caldo*

## 5.2.- Risultati

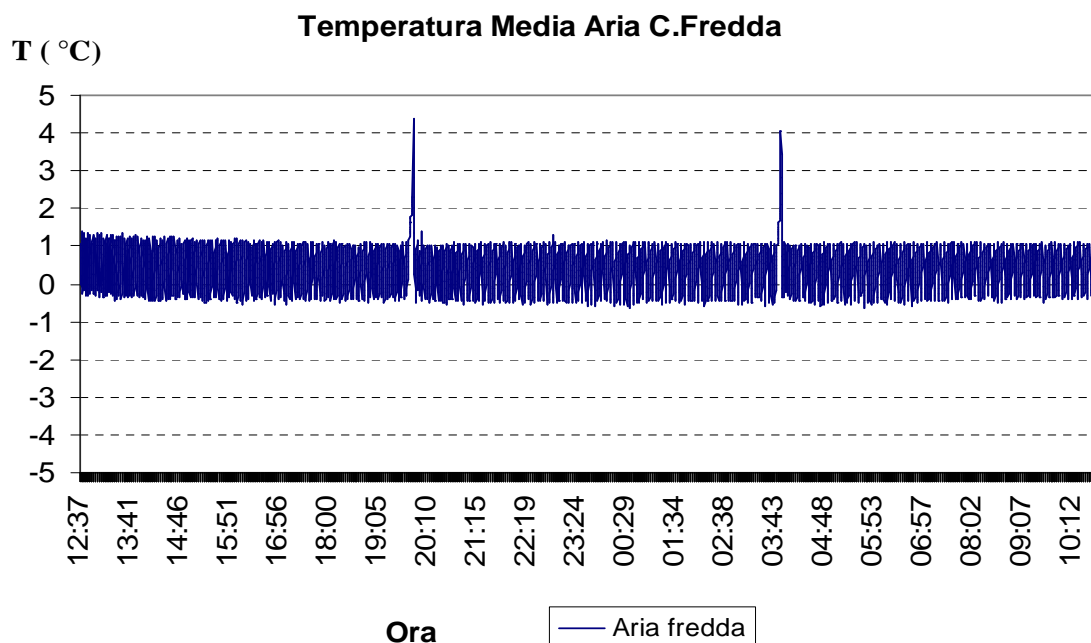
### 5.2.1.- Temperatura dell'aria

I risultati della prova sul campione sono mostrati in seguito. I sensori per la misura della temperatura hanno riportato i dati di temperatura media che si mostrano nelle figure 5.8 e 5.9:



*Fig 5.8.- Andamento della temperatura media dell'aria nella camera calda*

Nella figura si osserva una leggera diminuzione della temperatura durante la notte, coincidente con l'ore nelle quale il riscaldamento nel laboratorio è stato spento. Comunque questa variazione non ha influenza sui risultati poichè, come vedremo più avanti, sarà preso in considerazione il periodo stazionario.



*Fig 5.9.- Andamento della temperatura media dell'aria nella camera fredda*

La temperatura dell'aria nella camera fredda invece risulta di essere indipendente delle variazioni di quella ambiente nel laboratorio.

I valori rappresentati nel grafico sono stati già corretti dagli errori di acquisizione dei sensori, eliminando il valore fornito da una certa termocoppia del calcolo della media se esso era troppo distante degli altri vicini nel spazio.

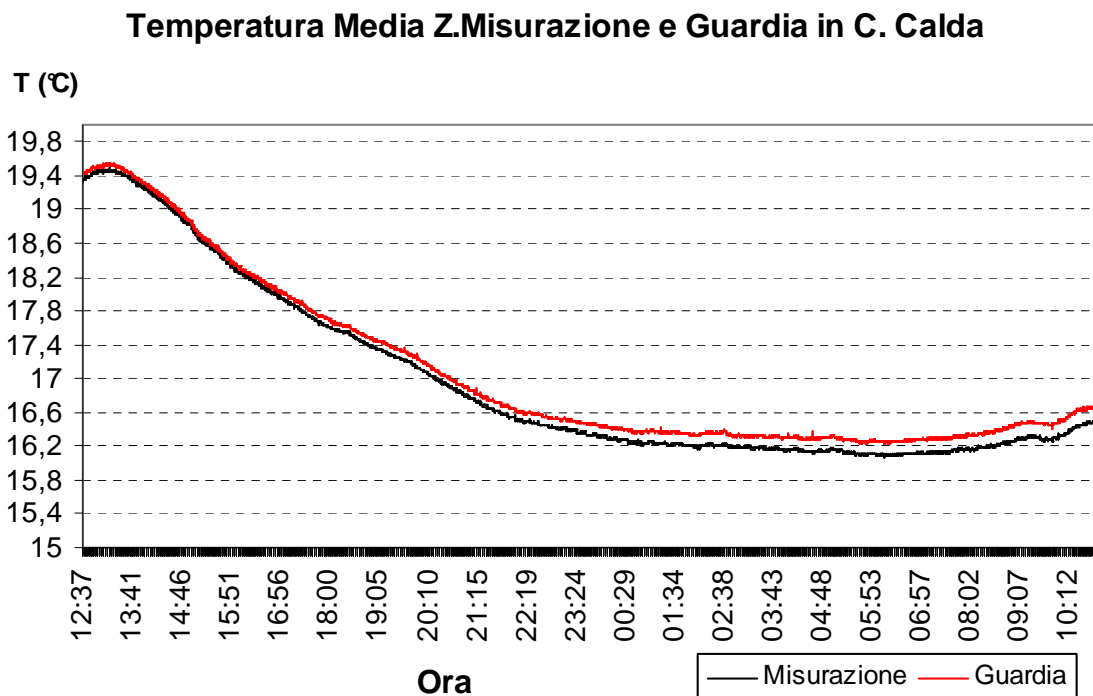
Pure dopo queste correzioni puntuali, succede che due volte durante la prova viene registrato un aumento subito di tre/quattro gradi nella temperatura media dell'aria per ritornare poi nei valori usuali. Visto che non è questo un errore nella misura (l'aumento è stato registrato da tutte le termocoppie), si ritiene che il fenomeno è dovuto al funzionamento stesso del sistema di refrigerazione, coincidendo nel tempo l'innalzamento della temperatura con il gocciolare del impianto frigorifero.

Al tempo della scelta del periodo stazionario sarà stato considerato opportunamente questo comportamento.

### 5.2.2.- Temperatura superficiale

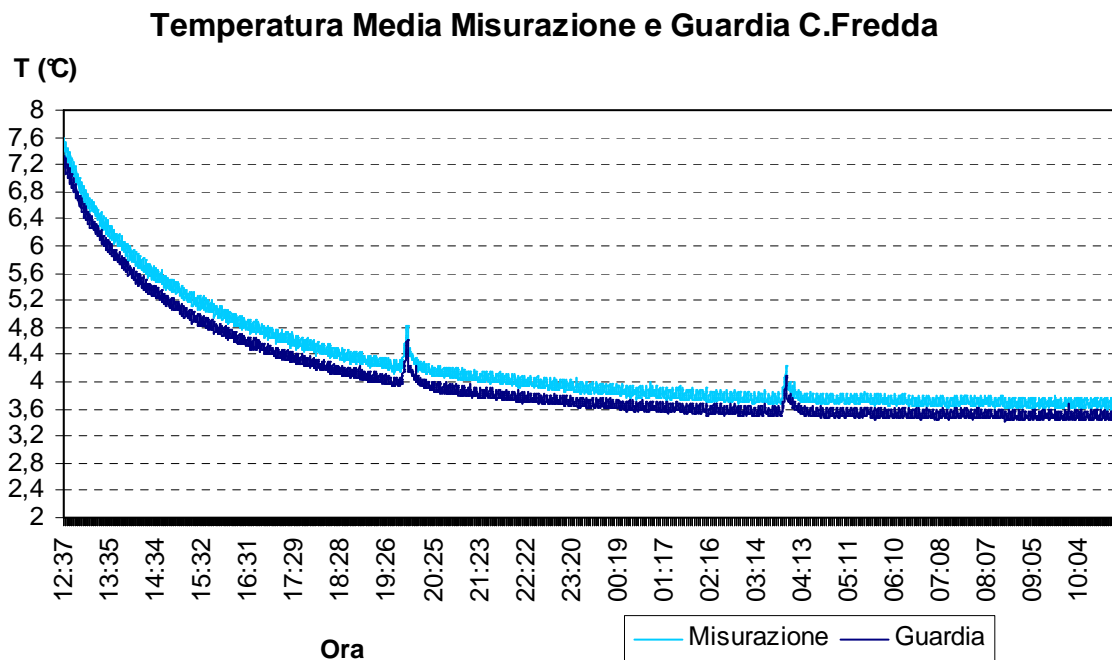
L'andamento delle temperature superficiali, individuato dalle termocoppie, non segue strettamente quello dell'aria, essendo le variazioni in quest'ultimo molto più veloci. Questo è dovuto all'inerzia termica del campione.

Nel grafico della camera calda si osserva questo comportamento. La temperatura scende lentamente durante al meno dieci ore, fino a quando viene stabilizzata in un valore attorno 16-17 °C. La temperatura è leggermente inferiore nella zona di misurazione dato che non influiscono le condizioni di bordo e quindi il flusso termico è maggiore.



*Fig 5.10.- Andamento della temperatura superficiale in camera calda, sezione di misura e anello di guardia*

La figura 5.11 mostra l'andamento della temperatura superficiale nella camera fredda. Bisogna dire che prima dell'inizio della acquisizione dei dati, la camera era stata già accesa durante un tempo, ed è per questo che la temperatura al inizio non é quella ambiente nel laboratorio.



*Fig 5.11.- Andamento della temperatura superficiale in camera fredda, sezione di misura e anello di guardia*

Sono da risaltare nel grafico, due salite improvvisi della temperatura, coincidenti con quelli viste nell'aria risultato del funzionamento del sistema frigorifero.

### 5.2.3.- Flusso termico

Il flusso termico aumenta in maniera costante durante le prime ore della prova; poi sembra stabilizzarsi. Infatti rimane così durante un tempo superiore a cinque ore, ed è durante quel tempo che si è considerato lo stato stazionario. Nella parte destra si osserva l'effetto del riscaldamento, con un aumento della temperatura nell'interno della camera calda e quindi del flusso termico attraverso il provino.

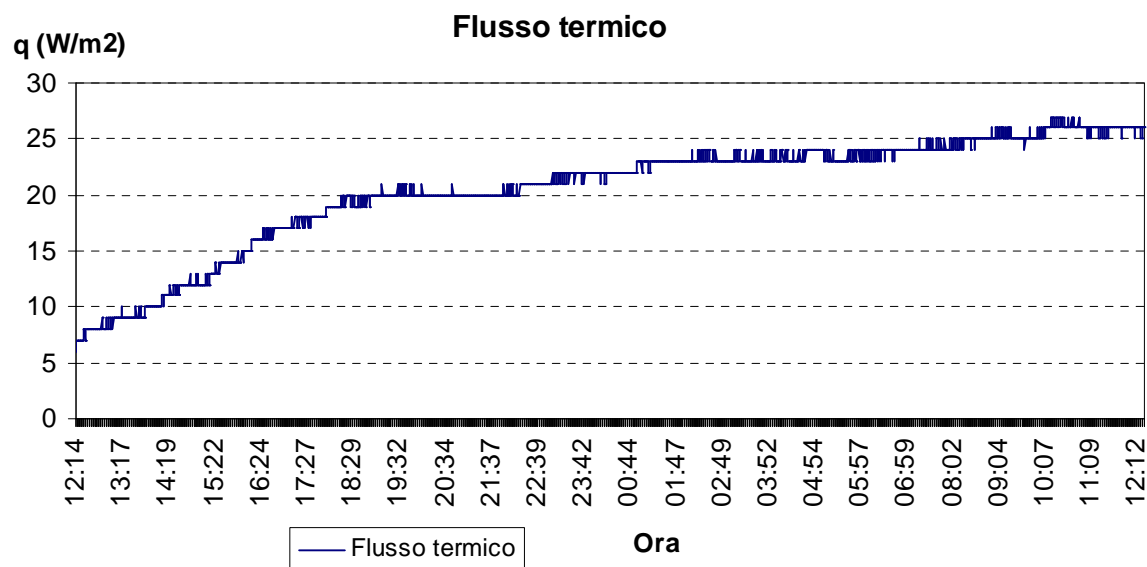


Fig 5.12.- Flusso termico sulla superficie del provino

#### 5.2.4.- Individuazione del regime stazionario

L'inizio del regime stazionario, in accordo con le verifiche di stazionarietà imposte dalla norma e riportate al paragrafo 4.4, si è individuato il giorno 10/12/2008 alle ore 4:01. Si riportano graficamente i valori delle temperature superficiali in regime stazionario (figure 5.13,5.14). Il flusso termico nello stesso periodo, si considera :

$$q = 23 \text{ W/m}^2$$

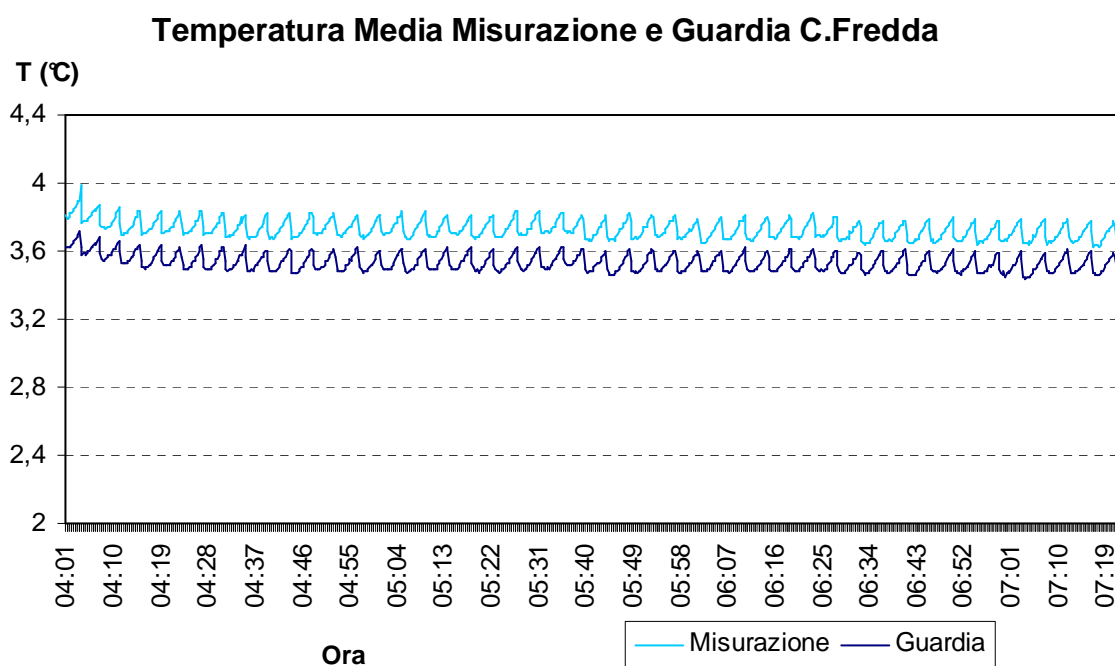


Fig 5.13.- Temperatura media superficiale in camera fredda in regime stazionario



### Temperatura Media Z.Misurazione e Guardia in C. Calda

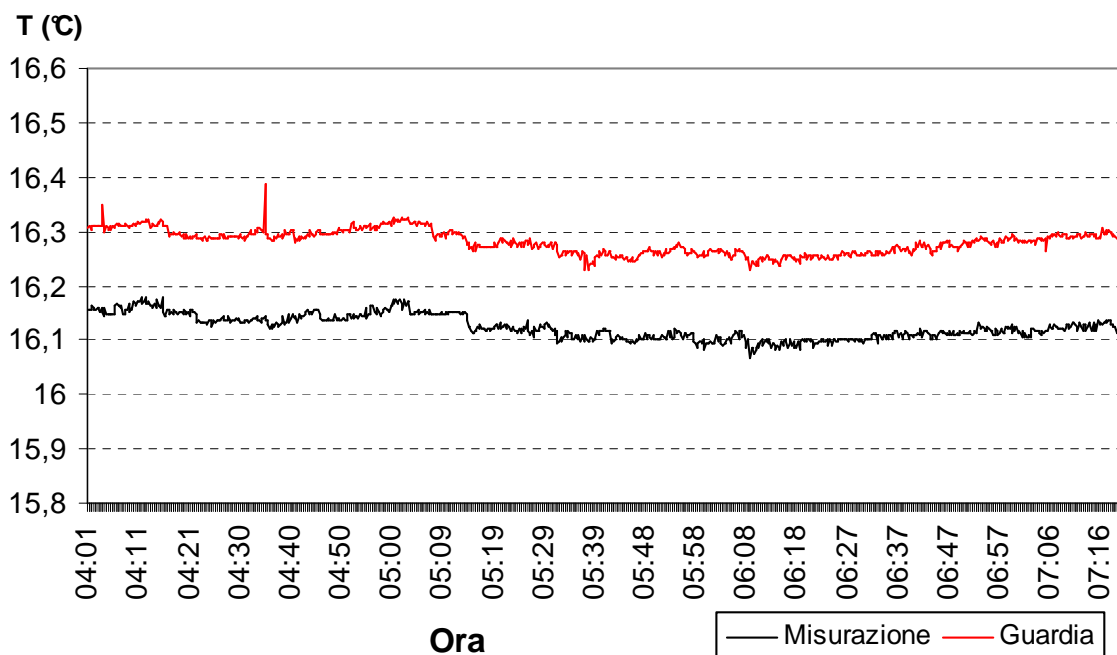


Fig 5.14.- Temperatura media superficiale in camera calda in regime stazionario

Le condizioni della prova sono riassunte nella seguente tabella:

Grandezza misurata	$T_a$ c.calda (°C)	$T_a$ c.fredda (°C)	$T_{sup}$ c.calda (°C)	$T_{sup}$ c.fredda (°C)	Flusso Termico (W/m <sup>2</sup> )
Valore medio	20,03	0,45	16,13	3,74	23

Tabella 5.1.- Risultati della prova sul campione

### 5.3.- Verifiche di accettabilità e calcolo della resistenza termica

Affinché il valore della resistenza termica calcolato attraverso le misurazioni di temperatura e flusso termico possa essere considerato come valido, devono essere soddisfatti alcuni requisiti che ne verifichino l'accettabilità del metodo. Innanzitutto si deve verificare la stazionarietà delle temperature dell'aria e lo sbilanciamento del flusso termico.

La norma UNI EN 1934 prescrive al punto 6.3.4 che la fluttuazione della temperatura media dell'aria si mantenga entro il  $\pm 2\%$  della differenza tra le temperature fra le due camere e le massime derive a lungo termine non eccedano l'1% della differenza di temperatura attraverso il provino.

Il flusso di sbilanciamento  $\varphi_2$  deve essere  $\leq$  del 4% del flusso termico  $\varphi_1$  che attraversa il provino nella zona di misura. Di questo 4%, il 2% è dovuto allo sbilanciamento della temperatura media tra zona di misura e anello di guardia ( $\varphi_2'$ ) ed il 2% è dovuto alla non uniformità di temperatura tra la zona di guardia e quella di misura ( $\varphi_2''$ ).

I valori dei diversi flussi di sbilanciamento si trovano mediante l'impiego delle seguenti equazioni:

$$\varphi_2' = (\lambda_f + \lambda_s) \cdot p \cdot \Delta T_{g1} / 2 \quad (5.1)$$

$$\varphi_2'' = (\lambda_f + \lambda_s) \cdot p \cdot \Delta T_{g2} / 2 \quad (5.2)$$

dove :

- $\Delta T_{g1}$  è il valore assoluto della differenza tra la media delle temperature misurate nell'anello di guardia e nella zona di misura;

	<i>Camera Calda</i>	<i>Camera Fredda</i>
$\Delta T_{g1} \text{ (K)}$	0,194	0,155

Tabella 5.1.-Valori di  $\Delta T_{g1}$

- $\Delta T_{g2}$  è pari ad  $\frac{1}{4}$  della massima differenza di temperatura misurata delle termoresistenze o nella sezione di guardia o nella zona di misura;

$\Delta T_{g2} \text{ (K)}$	<i>Camera Calda</i>	<i>Camera Fredda</i>
<i>Zona di Misura</i>	0,905	0,613
<i>Zona di Guardia</i>	1,912	1,559

Tabella 5.2.-Valori di  $\Delta T_{g2}$

- $\lambda_s$  risulta trascurabile, poiché è la conducibilità termica del termoflussimetro il cui spessore è molto piccolo in relazione a quello della parete di prova;
- $\lambda_f$ , caso dei campioni monostrato come il nostro, si ricava da:

$$\lambda_f = U \times s \quad (5.3)$$

dove  $s$  è lo spessore del provino ed  $U$  la sua trasmittanza termica (ottenuta dalla prova stessa).

I risultati delle verifiche sono riassunti nella tabella 5.3

Verifica stazionarietà temperatura dell'aria				
Dev St T camera calda	Dev St T camera fredda	Delta T	Dev St. < 2% Delta T	ACCETABILITA'
0,059	0,575	19,58	0,392	NO
Verifiche stazionarietà delle temperature superficiali				
Differenza di temperature misurate a lungo termine sulla linea di tendenza (°C)		<1/100 * (Tsi <sub>med</sub> – Tse <sub>med</sub> )		ACCETABILITA'
Tsi <sub>0</sub> – Tsi <sub>f</sub>   =	0,024	0,124		SI
Tse <sub>0</sub> – Tse <sub>f</sub>   =	0,048	0,124		SI
Uniformità di temperatura superficiale				
	[W]	Valori	< 2% Φ <sub>1</sub>	ACCETABILITA'
CAMERA CALDA	Φ <sub>2</sub> '	0,022	0,46	SI
	Φ <sub>2</sub> ''	0,067		SI
CAMERA FREDDA	Φ <sub>2</sub> '	0,027	0,46	SI
	Φ <sub>2</sub> ''	0,055		SI

Tabella 5.3- Verifiche de accetabilità delle condizioni di prova

Dell'analisi delle condizioni d'accettabilità si conclude che l'oscillazione della temperatura dell'aria nella camera fredda è superiore a la massima permessa nella norma, sebbene ancora sia ragionevole in paragone alle dimensioni della camera e quindi alla difficoltà di controllo delle condizioni ambientali. Essendo rigorosi, il valore della resistenza termica ottenuto nella prova non dovrebbe essere valido, ma ci sono due fattori importanti che non possono essere trascurati:

- Sono state impiegate termocoppie di alta precisione per la misura della temperatura nell'aria. Inoltre, non sono state ricoperte e sono quindi molto sensibile alla variazione del flusso di corrente d'aria accanto ad esse.
- Il sistema di refrigerazione impiegato non permette un controllo più stretto delle condizioni nella camera fredda di quello realizzato nella prova, intanto non è possibile mantenere accesi i ventilatori dell'evaporatore quando il circuito di refrigerazione non è in funzionamento
- Per di più sono state realizzate altre prove a temperature diverse tra le due camere, essendo trascurabili le variazioni fra i valori ottenuti.

Rilassando leggermente la condizione di accettabilità, fatto conto di quello detto nel paragrafo soprastante, a seguito si mostra il calcolo della resistenza termica da superficie a superficie del campione di prova.

A questo scopo viene impiegata l'equazione indicata nella norma:

$$R = \frac{(\Delta T_s)}{q} \quad (5.4)$$

Il valore finale misurato sarà la media per il periodo in regime stazionario della prova.

La resistenza termica totale  $R_t$ :

$$R_t = R + R_{\text{sup}} = R + 0,17 = 0,71 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \quad (5.5)$$

La conducibilità termica  $k$  del provino si calcola facendo uso della equazione:

$$k = \frac{s}{R} = \frac{0,1}{0,54} = 0,186 \frac{W}{mK} \quad (5.6)$$

Finalmente, la trasmittanza termica normalizzata  $U$  del campione viene calcolata come l'inverso della sua resistenza:

$$U = \frac{1}{R_t} = 1,41 \frac{W}{m^2 K} \quad (5.7)$$

I risultati finali della prova sono riassunti nella tabella 5.4:

<b><i>Resistenza <math>R</math> (<math>m^2K/W</math>)</i></b>	<b><i>0,54</i></b>
<b><i>Resistenza Totale <math>R_t</math> (<math>m^2K/W</math>)</i></b>	<b><i>0,71</i></b>
<b><i>Coducibilità <math>k</math> (<math>W/mK</math>)</i></b>	<b><i>0,186</i></b>
<b><i>Trasmittanza <math>U</math></i></b>	<b><i>1,41</i></b>

# Conclusioni

Il lavoro di tesi è stato quello di terminare la costruzione della *HotBox* per la misurazione della trasmittanza termica di finestre e porte complete secondo la norma UNI EN ISO 12567-1.

Oggetto di questa tesi sono stati da una parte alcuni aspetti pratici della costruzione della macchina e dall'altra il collegamento dei sensori al computer e la programmazione dell'applicazione informatica per la acquisizione ed elaborazione dei dati.

Si è quindi proceduto a fissare la resistenza elettrica nella camera calda in maniera da fornire un riscaldamento più omogeneo possibile, con speciale attenzione nel lasciare spazio sufficiente per la dilatazione del cavo quando circola corrente elettrica all'interno. Inoltre, è stato verificato con la camera termografica che il materiale scelto nella fase di disegno per il pannello di irridigimento effettivamente presentasse un'emissività adeguata ( $\varepsilon > 0,8$ ) prima di procedere alla sistemazione di esso come schermo alla radiazione.

Infine sono stati installati i sensori. Nella parte posteriore di ogni camera si è messo un armadio dove vengono sistemati i moduli di acquisizione e l'interfaccia ethernet della *CompactFieldPoint* insieme al contatore di energia (solo nella camera calda) ed i diversi interruttori elettrici.

Dato che la lunghezza delle sole termocoppie non è stata sufficiente per raggiungere tutti i punti di misurazione, si è dovuto aggiungere un cavo supplementario speciale per termocoppie tipo T di cinque metri. Questi cavi entrano nelle camere attraverso due buchi nella parte posteriore.

Si è studiata in maniera approfondita la normativa esistente per avere un'idea chiara dei procedimenti di prova ed i calcoli e le verifiche indispensabili.

Si è configurato anche il collegamento al computer dei moduli di acquisizione, assegnando ad ognuno la sua direzione IP e stabilendo il tipo di termocoppie impiegate con il software *Measurement Automation* della *National Instruments*.

Dopo aver acquistato agilità nella programmazione grafica con LabVIEW mediante la realizzazione di diversi modelli, viene fatto il programma per la acquisizione ed il salvataggio dei dati. Inizialmente si è cominciato con lo sviluppo del programma di acquisizione per la calibrazione secondo la norma 12567-1. Poi è stato necessario realizzare le modifiche necessarie affinché esso fosse valido per la misurazione con la UNI EN 1934. Questo nuovo programma è più semplice del primo visto che il numero di sensori da impiegare è minore (sessanta invece che novantaquattro) e i calcoli sono meno faticosi.

Pronta l'applicazione si è sistemato nell'apertura del pannello di supporto un campione di prova in calcestruzzo alleggerito. Dato che le dimensioni di esso non erano standard, si è dovuto utilizzare silicone per ottenere un serramento appropriato e conseguentemente, dopo la prova, si è dovuto rimpiazzare la gomma nel bordo del pannello di supporto.

Le misure sono state effettuate presso il laboratorio di Energetica dell'Università degli Studi di Perugia, ottenendo una resistenza totale in regime stazionario per il campione secondo la norma UNI EN 1934 :  $R_t = 0,71 \text{ m}^2\text{K/W}$

Per verificare la riproducibilità dei risultati é stata effettuata un'altra prova sul campione. Questa volta le temperature delle camere erano 10-30°C. I risultati ottenuti sono stati simili a quelli della prima misurazione.

L'esecuzione della prova con termoflussimetro è stata di grande aiuto per fare esperienza nella regolazione ed il funzionamento dell'apparecchiatura e poter così proporre diversi miglioramenti sulla macchina.

Ad esempio, si è accertata l'esistenza di un gradiente termico in direzione verticale non trascurabile nell'aria della camera calda e si tenterà di minimizzarlo mediante l'impiego di un piccolo ventilatore che in successive prove sarà sistemato nella parte bassa della camera, così da favorire il flusso della convezione naturale. La potenza del ventilatore sarà aggiunta nei calcoli a quella della resistenza come potenza immessa nella camera.

Al fine di migliorare l'accuratezza delle misure i lavori da effettuare a breve scadenza nella HotBox sono due (oltre all'introduzione del ventilatore):

- Miglioramento della chiusura delle camere, mediante l'impiego di una striscia di gomma attaccata sulla superficie del pannello di supporto;
- Ottenimento della resistenza termica del pannello di supporto nelle prove di calibrazione della HotBox mediante l'impiego di pannelli di calibrazione della resistenza termica nota.
- Verrà effettuata una campagna di misura su provini omogenei di conducibilità nota seguendo la procedura della norma UNI EN ISO 12567-1 allo scopo di verificare l'attendibilità delle misure così da poter iniziare la certificazione su infissi.



# Bibliografia

- [1] G. Guglielmi, C. Pisoni, *Elementi di trasmissione del calore*, Ed. Veschi, Milano, 1990
- [2] I. Barducci, *Trasmissione del calore*, Ed. Masson, Milano, 1996
- [3] A. Sacchi, G. Cagliaris, *Fisica Tecnica*, UTET, Torino, 1990
- [4] M. Felli, *Lezioni di Fisica Tecnica Volumen II: Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell'illuminazione*, Morlacchi Editore, Perugia, 2004
- [5] UNI EN ISO 8990 *Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario, Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia*, Giugno 1999
- [6] UNI EN ISO 12567-1 *Descrizione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda, finestre e porte complete* Gennaio 2002
- [7] UNI EN 1934 *Prestazione termiche degli edifici: Determinazione della resistenza termica per mezzo del metodo della camera calda con termoflussimetro* Maggio 2000
- [8] K. Ghazi Wakili, C. Tanner *U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks Hot box measurement versus numerical analysis* Energy and Buildings 35 (2003)
- [9] T. Nussbaumer, R. Bundi, Ch. Tanner, H. Muehlebach *Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels* Energy and Buildings 37 (2005)
- [10] P. Fazio, A. K. Athienitis, C. Marsh, J. Rao *Enviromental chamber for investigation of building envelope performance* Journal of architectural engineering Giugno 1997
- [11] Y. Fang, P. C. Eames, B. Norton, T. J. Hyde *Experimental validation of a numerical model for heat transfer in vacuum glazing* Solar Energy 80 (2006)
- [12] National Instruments -- [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [13] LabVIEW. *LabVIEW fundamentals* Agosto 2005